برگاب و نفوذ

برگاب
نفوذ آب به داخل خاک
کلّیات
مکانیسم نفوذ آب در خاک
معادله‌های نفوذ
اندازه‌گیری نفوذ
استفاده از منحنی نفوذ
نمایه‌های نفوذ
نمایه Φ
نمایه W
نمایه حداقل
مسائل
منابع برای مطالعه بیشتر

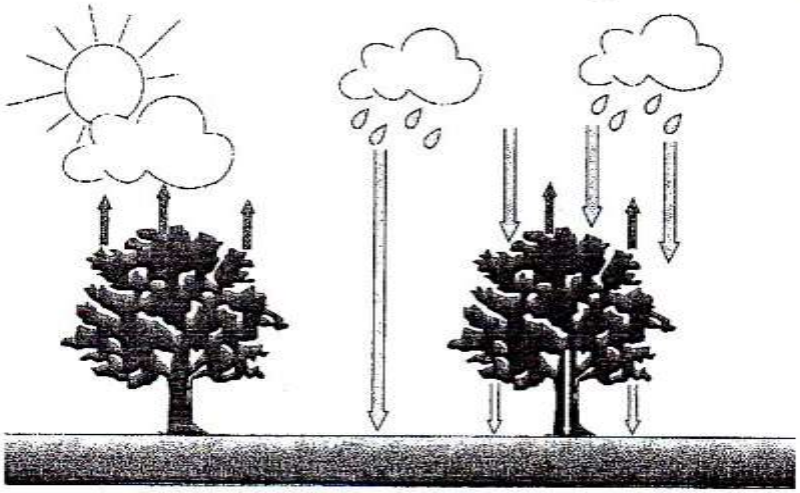
۸-۱ برگاب

اکثر ما این پدیده را بخوبی دریافته‌ایم که در هنگام شروع بارندگی برای جلوگیری از خیس‌شدن خود به زیر درختان پناه ببریم. زیرا شاخ و برگ درخت مقداری از بارندگی را گرفته و مانع از رسیدن مستقیم آن به سطح زمین می‌شود. به آن بخش از باران که توسط پوشش گیاهی گرفته می‌شود **برگاب** یا *باران-گیرش* (interception) گفته می‌شود. برگاب در آغاز بارندگی بسیار زیاد بوده و ممکن است در یک پوشش گیاهی متراکم تا ۱۰۰ درصد مقدار بارندگی را شامل شود. اما بتدریج که شاخ و برگ از آب اشباع می‌گردد، آب از نوک و حاشیه برگها به زمین چکیده و یا بصورت جریان کوچکی از روی ساقه گیاه به زمین ریخته می‌شود. به مقدار آبی که بصورت جریان از شاخ و برگ و ساقه به سمت زمین حرکت می‌کند *جریان ساقه‌ای* (stem flow) گویند. بخشی از برگاب ممکن است مستقیماً از سطح پوشش گیاهی تبخیر شده و هیچ وقت به زمین نرسد، همانطور که بخشی از بارندگی نیز ممکن است از لابلای پوشش گیاهی بدون هیچ مانعی وارد سطح زمین شود. آن قسمت از بارندگی که بدون مانع از بین درختان و از فضاهای خالی بین برگها وارد زمین می‌شود *میان-بارش* (through fall) نام دارد. بنابراین در هنگام بارندگی روی زمینی که دارای پوشش گیاهی قابل توجه است بخشی از باران بصورت میان-بارش مستقیماً به سطح خاک می‌رسد و بخش دیگر پس از برخورد با شاخ و برگ به دو قسمت تقسیم می‌شود قسمتی از بارندگی از روی شاخ و برگ گیاه مستقیماً تبخیر می‌گردد، قسمتی از سطح برگها به

سطح زمین می‌چکد یا بصورت جریان ساقه‌ای وارد سطح خاک می‌گردد. البته این توصیف بیشتر در مورد درختان صادق بوده و در پوشش‌های علفی نمی‌توان این عناصر را از همدیگر تفکیک کرد. توصیف ریاضی پدیده برگاب بصورت زیر می‌باشد

$$P = I + (S + T) \qquad (۱-۸)$$

که P مقدار بارندگی در بالای پوشش گیاهی، I مقدار برگاب، S جریان ساقه‌ای و T مقدار میان-بارش است. اجزای فرمول فوق در شکل ۸-۱ برای یک پوشش درختی نشان داده شده است این وضعیت در حوضه‌های غیر جنگلی و گیاهان زراعی (در اراضی دیم و آبی) نیز صادق می‌باشد. در شکل ۸-۱ جریان ساقه‌ای با پیکان سفید روی تنه درخت و میان بارش مستقیم و غیرمستقیم بصورت پیکانهای خاکستری و برگاب بصورت پیکانهای تیره رنگ که در اثر تبخیر به سمت بالا در جریان می‌باشد نشان داده شده است.



شکل ۸-۱ فرایند بارانگیرش در یک پوشش درختی

اگر بخواهیم مقدار باران-گیرش را از روی فرمول فوق برآورد کنیم خواهیم داشت:

$$I = P - (S + T) \qquad (۲-۸)$$

بنابراین لازم خواهد بود اجزای این معادله (T, S, P) اندازه‌گیری شوند. برای تعیین اجزای معادله ۸-۲ می‌بایست اولاً مقدار بارندگی (P) از طریق نصب باران سنج در بالای پوشش گیاهی اندازه‌گیری شود. ثانیاً باید مقدار جریان ساقه‌ای را نیز در دست داشته باشیم. اندازه‌گیری مقدار جریان ساقه‌ای در پوشش‌های غیردرختی امکان‌پذیر نمی‌باشد ولی در مورد درختان جنگلی این کار از طریق نصب سینی‌های مخصوص به دور تنه درخت و هدایت این جریان به داخل ظرف اندازه‌گیری امکان‌پذیر می‌باشد. میان-بارش نیز با نصب باران‌سنج در زیر پوشش گیاهی مستقیماً اندازه‌گیری می‌شود.

● مثال ۸-۱

طی یک بارندگی روی یک حوضه جنگلی مقدار بارندگی ۳/۵۱ سانتی‌متر و مقادیر میان-بارش و جریان ساقه‌ای در یک قطعه آزمایشی به مساحت ۰/۱ هکتار اندازه‌گیری شده است. متوسط میان-بارشها با نصب باران سنج‌های مختلف در زیر پوشش گیاهی ۲/۱۵ سانتی‌متر و مقدار کل جریان ساقه‌ای از طریق نصب سینی‌های مخصوص به دور تنه تمام درختان این قطعه آزمایشی ۱۱۲۰۰ لیتر بوده است. مقدار و درصد باران-گیرش را محاسبه کنید.

حل

$11200\ \text{lit} = 11.2\ \text{m}^3$

$0.1\ \text{ha} = 1000\ \text{m}^2$

$S = 11.2\ \text{m}^3/1000\ \text{m}^2 = 0.0112\ \text{m}$

$S = 1.12\ \text{cm}$

$S + T = 1.12\ \text{cm} + 2.15\ \text{cm} = 3.27\ \text{cm}$

$I = P - (S + T) = 3.51\ \text{cm} - 3.27\ \text{cm} = 0.24\ \text{cm}$

$I/P = 0.24\ \text{cm}/3.51\ \text{cm} = 0.068 = 6.8\%$

بنابراین مقدار باران-گیرش ۰/۲۴ سانتی‌متر و درصد آن نسبت به کلّ بارندگی ۶/۸ درصد است. بدین ترتیب مشاهده می‌شود که حدود ۷ درصد بارندگی توسط شاخ و برگ درختان گرفته می‌شود که امکان تبخیر مستقیم این آب از سطح پوشش گیاهی و تلف شدن آن وجود دارد.

مقدار باران-گیرش بستگی به نوع پوشش (سوزنی برگ یا پهن برگ)، **شاخص سطح برگ** (Leaf Area Index) و عوامل دیگری مانند ***طرز قرارگرفتن برگها*** دارد. شاخص سطح برگ (LAI) عبارت است از جمع مساحت برگهای یک درخت یا پوشش گیاهی تقسیم بر سطح سایه‌انداز آن پوشش. بعنوان مثال اگر سطح سایه انداز یک درخت ۳ متر مربع و جمع مساحت برگهای آن درخت ۲۱۰ متر مربع باشد شاخص سطح برگ برای آن درخت $\frac{۲۱۰}{۳} = ۷۰$ می‌باشد و یا اگر در یک متر مربع زمین که پوشیده از علف می‌باشد جمع مساحت برگهای موجود در آن ۱۲ متر مربع باشد $\text{LAI} = \frac{۱۲}{۱} = ۱۲$ خواهد بود. در پوشش‌های زراعی شاخص سطح برگ معمولاً ۲۴ برابر ارتفاع متوسط گیاه (h) در نظر گرفته می‌شود ($\text{LAI} = 24h$) مقدار باران‌گیرش برای درختان سوزنی برگ حدود ۴ میلی‌متر و در مورد درختان پهن برگ تقریباً ۷ میلی‌متر است. یعنی اگر مقدار بارندگی کمتر از ۷ میلی‌متر باشد عملاً چیزی از آن به سطح زمین نمی‌رسد. اما در پوششهای غیرجنگلی تخمین آن بسیار مشکل و در حوضه‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک مرتعی مقدار آن کمتر از ۱ الی ۲ میلی‌متر است که عملاً در محاسبات هیدرولوژیک این مناطق از آن صرف‌نظر می‌شود.

آزمایشاتی که در مناطق جنگلی صورت گرفته است نشان می‌دهد که در جنگلهای پهن برگ حدود ۱۲ درصد بارندگی سالانه بصورت برگاب بوده و پوشش گیاهی مانع از رسیدن آن به زمین می‌شود. بهمین دلیل در برخی از کشورها که نیاز فراوان به آب می‌باشد با حذف پوشش گیاهی از سطح حوضه‌های آبریز میزان رواناب را افزایش می‌دهند ولی باید توجه داشت که این امر ممکن است خطر فرسایش خاک و سیل را بهمراه داشته باشد.

بر خلاف این ایده که حذف پوشش گیاهی باعث افزایش رواناب می‌شود در بعضی جاهای دنیا مشاهده شده است که با قطع درختان جنگلی میزان رواناب کاهش پیدا کرده است. احتمالاً دلیل این امر آن بوده است که مه یا هوای مه‌آلود در عبور از روی جنگل مقدار زیادی از آب خود را توسط برگ درختان از دست می‌دادند، لذا آبی که برگ درختان از این طریق دریافت می‌داشتند در بیلان آب حوضه مؤثر بوده است که با حذف پوشش گیاهی این مقدار آب نیز حذف گردیده است.

رابطه ساده‌ای که بین میزان بارندگی (P) و برگاب (I) برای پوشش‌های مختلف گیاهی بدست آمده است بصورت $I = a + bP^n$ می‌باشد. a، b و n ضرایبی هستند که بستگی به نوع پوشش داشته و در جدول ۸-۱ مقادیر آنها برای پوشش‌های مختلف داده شده است. در این فرمول تجربی P و I بر حسب اینچ می‌باشند و در جدول ۸-۱ نیز h ارتفاع پوشش گیاهی بر حسب فوت است. مثلاً چنانچه بارانی بمقدار ۳۸ میلی‌متر ریزش نماید در یک مزرعه ذرت که ارتفاع بوته‌ها ۱۵۰ سانتی‌متر است مقدار برگاب ۰/۳۹۲ اینچ (۱۰ میلی‌متر) خواهد بود. زیرا:

$P = 38 \text{ mm} = 1.5 \text{ inch}$

$h = 150 \text{ cm} = 4.9 \text{ foot}$

$a = 0.005\ h = 0.005\ (4.9) = 0.0245$

$b = 0.05\ h = 0.05\ (4.9) = 0.245$

$n = 1.0$

$I = 0.0245 + 0.245\ (1.5)^1$

$I = 0.0245 + 0.3675 = 0.392 \text{ inch} = 9.9 \approx 10 \text{ mm}$

جدول ۸-۱ مقادیر ضرایب معادله $I = a + bp^n$ برای محاسبه برگاب

پوشش گیاهی	a	b	n
درختان میوه	0.04 h	0.18 h	1.0
درختان جنگلی پهن برگ	0.05 h	0.18 h	1.0
سیب‌زمینی و گوجه فرنگی و گیاهان مشابه	0.05 h	0.20 h	0.5
شبدر	0.005 h	0.08 h	1.0
یونجه	0.01 h	0.1 h	1.0
گندم و جو	0.005 h	0.04 h	1.0
ذرت	0.005 h	0.05 h	1.0

باران گیرش مسأله‌ای است که در مطالعات هیدرولوژی کمتر به آن توجه می‌شود. دلیل آن ممکن است به این علت باشد که عملاً اندازه‌گیری و یاتخمین مقدار آن بسیار مشکل است. اما باید به این نکته توجه داشت که از مقدار بارانی که روی حوضه در طی سال ریزش می‌کند بطور متوسط ۲۵ درصد آن به دلیل بارش گیرش تلف شده و به رواناب تبدیل نخواهد شد. مطالعات انجام شده نشان داده است که مقدار باران گیرش در فصل رشد گیاهان بین ۱۰ تا ۳۵ درصد و در سایر ایام سال بین ۵ تا ۲۰ درصد متغیر است. باران گیرش در اراضی زراعی نه تنها برای زراعت‌های دیم بلکه برای زراعت‌های آبی که به روش بارانی آبیاری می‌شوند نیز حائز اهمیت است.

تلفات ناشی از باران گیرش شامل دو قسمت عمده است. اولین قسمت ذخیره برگابی (interception storage) می‌باشد و آن مقدار آبی است (برحسب ارتفاع باران یا حجم آب) که روی شاخ و برگ باقی می‌ماند و قسمت دوم تلفات تبخیر از سطح خیس شده گیاهان است. چنانچه طی یک بارندگی بخواهیم تلفات ناشی از برگاب و باران گیرش را تخمین بزنیم می‌توان از فرمول تجربی زیر استفاده کرد.

$$L = S + KEt \qquad (۲-۸)$$

در این فرمول:

L = تلفات ناشی از برگاب (برحسب میلی‌متر)

S= ذخیره برگابی که بسته به نوع پوشش گیاهی بین ۰/۲۵ تا ۱/۲۵ میلی‌متر متغیر است.

K = درصد پوشش گیاهی نسبت به سطح کل زمین

E= سرعت تبخیر بر حسب میلی‌متر در ساعت (در روزی که بارندگی صورت گرفته است)

t = مدت بارندگی (ساعت)

مثلاً چنانچه طی یک روز در خردادماه که متوسط تبخیر ۸ میلی‌متر در روز می‌باشد بارانی به مدت ۴ ساعت و به مقدار ۴ میلی‌متر روی مزرعه گندم که ۹۰ درصد پوشش زمین را در بر می‌گیرد ریزش کند مقدار تلفات ناشی از برگاب با فرض ذخیره برگابی ۰/۷۵ میلی‌متر عبارت خواهد بود از:

$S = 0.75$ mm

$K = 0.9$

$E = 8$ mm/12 hr $= 0.67$ mm/hr

$t = 4$ h

$L = 0.75 + 0.9\ (0.67)\ (4) \approx 3.0$ mm

بطوریکه ملاحظه می‌شود در این شرایط ۳ میلی متر از جمع ۴ میلی‌متر بارندگی عملاً بوسیله برگاب تلف شده و تنها یک میلی‌متر به سطح زمین خواهد رسید.

برف‌گیرش (snow interception) پدیده مشابه باران گیرش در مورد برف نیز اتفاق می‌افتد. با

این تفاوت که مقدار برف‌گیرش در درختان سوزنی برگ که در زمستان نیز دارای برگ هستند نسبتاً زیاد بوده و تا زمانی که شاخه‌ها خم نشده و برف از روی آن ریخته نشود روی درخت باقی می‌ماند. درختان سوزنی برگ در حالت اشباع از برف حدود ۴ تا ۵ میلی‌متر آب را بصورت برف روی خود نگه می‌دارند. البته در این زمان مقدار تبخیر اندک بوده و سرانجام تمام برف باقی‌مانده روی شاخ و برگ از طریق ریزش مستقیم و یا جریان ساقه‌ای وارد سطح زمین می‌شود. آزمایشات انجام شده در جنگلهای سوزنی برگ نشان می‌دهد که ۲۰ تا ۵۰ درصد مقدار برفی که ریزش می‌کند توسط شاخ وبرگ درختان گرفته شده که بخش زیادی از آن پس از سنگین شدن روی زمین می‌ریزد و یا از طریق تبخیر خارج می‌شود.

۸-۲ نفوذ آب به داخل خاک

۸-۲-۱ کلّیات

با تعریفی که از باران-گیرش بعمل آمد حال ببینیم سرنوشت مقدار بارانی که پس از حذف باران-گیرش به سطح زمین می‌رسد چه خواهد بود. بخشی از نزولات جوّی پس از رسیدن به سطح زمین به داخل خاک **نفوذ** (infiltration) می‌کند. پدیده نفوذ فقط شامل واردشدن آب به داخل خاک است. این آب ممکن است در داخل زمین نیز به **حرکت عمقی** (percolation) خود ادامه دهد تا سرانجام وارد لایه‌های آبدار زیرزمینی شده و جزءمنابع آب زیرزمینی به حساب آید و یا آن‌که فقط صرف مرطوب کردن خاک شده و دوباره در اثر تبخیر- تعرق به هوا برگشت کند. نفوذ آب در خاک از دو جهت باید مورد بررسی قرارگیرد، یکی شدت نفوذ و دیگری مقدار نفوذ.

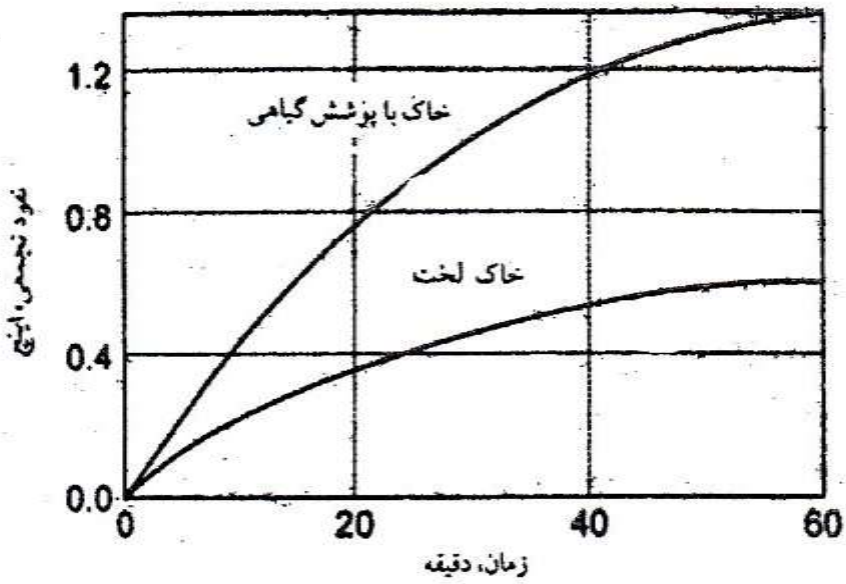
شدت یا سرعت نفوذ به ارتفاع آبی گفته می‌شود که اگر در روی زمین وجود می‌داشت می‌توانست در واحد زمان (فرضاً یک ساعت) در زمین نفوذ کند. مثلاً اگر شدت نفوذ در خاکی ۱۵ میلی‌متر در ساعت باشد و بارانی بشدت ۱۰ میلی‌متر در ساعت روی زمین ببارد به این معنی است که تمامی آب باران بلافاصله پس از برخورد با سطح زمین در خاک نفوذ خواهد کرد. آب فقط زمانی در سطح زمین انباشته یا جاری می‌شود که شدت بارندگی از سرعت نفوذ آب در خاک بیشتر باشد. سرعت نفوذ یکی از خصوصیات فیزیکی خاک بوده و به عوامل متعددی بستگی دارد. با توجه به این‌که سیلابهای حاصله از بارندگیها علاوه بر شدت بارندگی به سرعت نفوذ آب در خاک نیز بستگی دارد، لذا برآورد سرعت نفوذ آب در خاک در حوضه‌های آبریز حائز اهمیت فراوان است.

۸-۲-۲ مکانیسم نفوذ آب در خاک

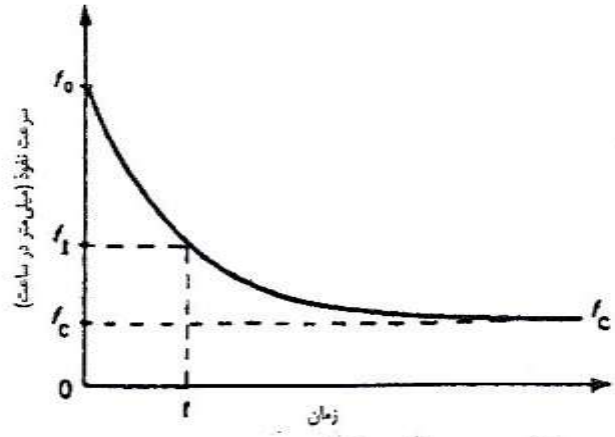
ورود آب به داخل خاک در نتیجه تأثیر توأم نیروهای ثقلی و مویینگی صورت می‌گیرد. نیروی ثقل فقط در جهت قائم عمل می‌کند، ولی نیروی مویینگی در ابتدا که خاک خشک بوده و

منافذ مویین خالی از آب است، هم در جهت عمودی و هم در جهت افقی یکسان عمل می‌کند. ولی بتدریج که منافذ مویین از آب اشباع شد تنها نیروی ثقل دخالت کرده و جریان نفوذ تقریباً فقط عمودی است. به همین دلیل سرعت نفوذ در ابتدای واردشدن آب به خاک زیاد و سپس بتدریج تقلیل یافته و به مقدار ثابتی که فقط نتیجه عمل نیروی ثقل است، می‌رسد. بنابراین مقدار آبی که در زمین نفوذ می‌کند صرف‌نظر از وضعیت سطح خاک بصورت تجمعی نسبت به زمان افزایش می‌یابد. مثلاً در شکل ۸-۲ مشاهده می‌شود که تیپ منحنی نفوذ تجمعی آب به داخل زمین چه در یک خاک لخت و چه در خاکی که پوشش گیاهی داشته باشد یکسان بوده و مقدار نفوذ (i) نسبت به زمان (t) بصورت نمایی افزایش می‌یابد. نفوذ آب در خاک به عواملی مانند بافت و ساختمان خاک، پوشش گیاهی، شیب‌زمین و از همه مهمتر قابلیت پراکندگی ذرات سطحی خاک بستگی دارد. اگر لایه سطحی خاک حاوی مقدار زیادی یون قابل تبادل سدیم باشد پس از مرطوب شدن ذرات خاک پراکنده شده و ظرفیت نفوذ بشدت کاهش می‌یابد. زیرا ذرات لای و رس در لابلای منافذ خاک قرار می‌گیرند و جلو نفوذ آب را سدّ می‌کنند. به همین دلیل نفوذ آب به داخل خاک در زمینهای رسی و سیلتی بسیار اندک است. همانطور که در شکل ۸-۲ مشاهده می‌شود منحنی نفوذ تجمعی آب به داخل خاک ابتدا با سرعت زیاد بالا رفته و سپس بتدریج این منحنی مسطح شده و از شدت نفوذ آب به داخل خاک کاسته می‌شود. بعبارت دیگر سرعت نفوذ آب به داخل خاک در ابتدا بسیار زیاد است و سپس بتدریج از سرعت نفوذ کاسته شده و مطابق منحنی ۸-۳ سرانجام در حدمعینی که به آن **نفوذ نهایی** گفته می‌شود ثابت می‌شود. اما نفوذ تجمعی آب به داخل خاک همواره سیر صعودی دارد. اینکه در شکل ۸-۲ مقدار نفوذ تجمعی در یک خاک لخت کمتر است به این دلیل می‌باشد که در این خاکها سطح زمین به سرعت سله بسته و جلو نفوذ آب سد می‌شود در حالیکه در خاکهای با پوشش گیاهی به دلیل خوب بودن ساختمان خاک این امر اتفاق نمی‌افتد. در شکل ۸-۳ سرعت اولیه ورود آب به داخل خاک در ابتدای شروع نفوذ f_0 و سرعت نهایی نفوذ با f_c نشان داده شده است. از روی چنین منحنی‌هایی که برای هر خاک می‌توان رسم کرد در هر لحظه از زمان (t) می‌توان سرعت یا شدت نفوذ (f_t) را به دست آورد.

با توجه به این‌که سرعت اولیه نفوذ (f_0) معمولاً بسیار زیاد است لذا در لحظات اول شروع بارندگی تقریباً تمام باران در خاک نفوذ می‌کند اما بتدریج ممکن است شدت باران بر سرعت نفوذ آب در خاک فزونی گرفته و مازاد آن در سطح زمین جاری شود. بنابراین مقدار نفوذ نهایی خاک که به آن **ظرفیت نفوذ** گفته می‌شود بر شدت رواناب مؤثر است. نفوذ اولیه حتی در یک‌خاک معین نیز ثابت نبوده و علاوه بر ساختمان و بافت خاک به درصد رطوبت اولیه خاک قبل از شروع بارندگی نیز بستگی دارد. مثلاً در شکل ۸-۴ منحنی‌های سرعت نفوذ برای یک نوع خاک که رطوبت اولیه آن در هنگام بارندگی (شروع نفوذ) متفاوت بوده نشان داده شده است.

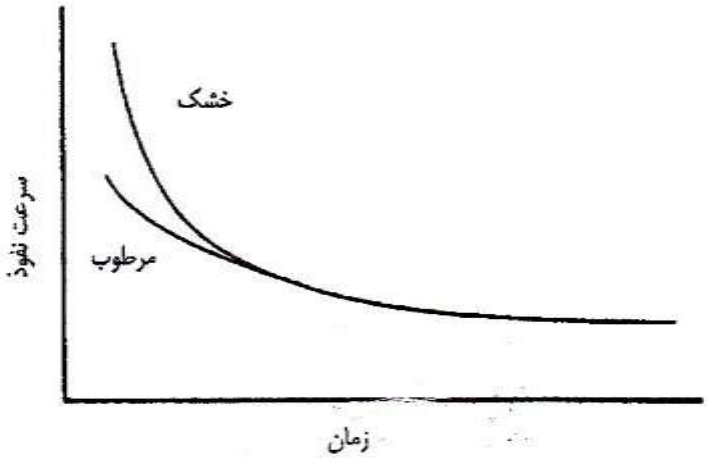


شکل ۸-۲ تیپ منحنی تجمعی نفوذ نسبت به زمان در یک خاک لخت و یا خاک با پوشش گیاهی



شکل ۸-۳ تیپ منحنی تغییرات سرعت نفوذ نسبت به زمان

بطوریکه مشاهده می‌شود چنانچه خاک در هنگام شروع بارندگی خشک باشد سرعت نفوذ آب در آن در ابتدا بمراتب بیشتر از هنگامی خواهد بود که باران روی همین خاک ولی با رطوبت اولیه زیاد ببارد. این امر می‌تواند بخوبی توجیه کننده این مطلب باشد که چرا در مناطق خشک که بارندگی کم است باز هم سیلابهای شدید اتفاق می‌افتد. در حالی که باتوجه به پایین بودن مقدار بارندگی باید انتظار داشت که تمام باران در خاک نفوذ کند. دلیل این امر آن است که اگر

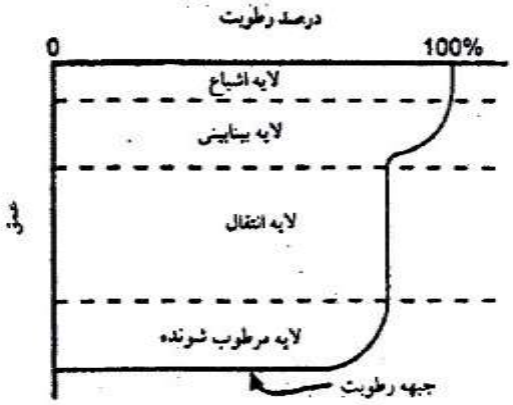


شکل ۸-۴ منحنی‌های نفوذ برای یک خاک مشخص به ازاء درصدهای مختلف رطوبت اولیه خاک

بارندگی روی خاکی ببارد که هنوز از باران قبل مرطوب است سرعت نفوذ آب در آن خاک به دلیل بالا بودن درصد رطوبت اولیه کاهش پیدا کرده و لذا بخش زیادی از بارش ممکن است درسطح زمین جاری شود و این حالتی است که به دلیل مرطوب بودن خاک در زمستان و بهار اتفاق می‌افتد. بنابراین در محاسبات سیل باید به درصد رطوبت خاک قبل از بارندگی نیز توجه کرد.

۸-۲-۳ معادله‌های نفوذ

برای تخمین میزان نفوذ ناچار باید معادله یا منحنی نفوذ نسبت به زمان را داشته باشیم. هنگامی که بارندگی روی سطح خاک می‌بارد اگر شدت باران کمتر از سرعت نفوذ آب در خاک باشد تمام آن در زمین نفوذ کرده و جریان غیر اشباع از لابلای منافذ مویینگی خاک به سمت پایین برقرار می‌شود اما در صورتی که شدت باران بیشتر از سرعت نفوذ آب در خاک باشد ابتدا لایه سطحی خاک اشباع شده و یک *جریانی پیستونی* (piston flow) از آب مطابق شکل ۸-۵ در خاک برقرار می‌شود. در این وضعیت لایه سطحی خاک اشباع شده و سپس رطوبت بصورت پیستونی به سمت اعماق لایه خاک حرکت می‌کند. منطقه پیشروی رطوبت را جبهه رطوبتی (wetting front) گویند. بنابراین برخلاف تصور هنگامی که خاک مرطوب می‌شود تا یک عمق معین رطوبت ثابت و سپس یکباره خاک پس از جبهه رطوبت خشک خواهد بود. حرکت آب در این جبهه از داخل منافذ خاک و بر اساس *قانون دارسی* (Darcy's law) انجام می‌شود. یکی از اولین معادله‌هایی که برای توصیف پدیده نفوذ آب در خاک ارائه شد معادله گرین ـ آمپت (Green-Ampt) می‌باشد.



شکل ۸-۵ الگوی نفوذ آب به داخل خاک

معادله گرین ـ آمپت در سال ۱۹۱۱ میلادی گرین (Green) و آمپت (Ampt) معادله‌ای را در شرایط بارندگی یکنواخت برای نفوذ آب به داخل زمین ارائه دادند که به صورت زیر می‌باشد.

$$f = K(H_o + S_w + L)/L \qquad (۸-۲)$$

در این معادله K ضریب هدایت هیدرولیکی خاک، H_o ارتفاع آب انباشته شده در سطح خاک، S_w پتانسیل ماتریک خاک در جبهه رطوبت، L فاصله سطح خاک تا جبهه رطوبت و f شدت نفوذ می‌باشد. حل معادله فوق مشکل بوده و در عمل معادله گرین ـ آمپت به صورت ساده زیر تخمین زده شده است.

$$f = \frac{A}{F} + B \qquad (۸-۵)$$

در این فرمول f سرعت نفوذ، F مقدار نفوذ تجمعی و A و B ضرایبی هستند که از روی آزمایش نفوذ تجمعی مطابق آنچه در مثال زیر آورده شده است بدست می‌آیند.

● مثال ۸-۲

در یک حوضه آبریز برای تعیین اجزاء معادله گرین ـ آمپت آزمایش نفوذ انجام گرفته و نتایج زیر بدست آمده است.

نفوذ تجمعی (سانتی‌متر)	سرعت نفوذ (سانتی‌متر در ساعت)	زمان (ساعت)
۰	۲	۰
۰/۸۵	۱/۴۱	۰/۵
۱/۴۷	۱/۰۹	۱
۲/۳۶	۰/۶۹	۲
۳/۵۸	۰/۵۳	۴

ضرایب A و B را در این معادله بدست آورده و مقدار نفوذ تجمعی و سرعت نفوذ را پس از ۶ ساعت بارندگی محاسبه کنید.

حل

مختصات دو نقطه از جدول فوق راگرفته و در معادله ۸-۵ قرار می‌دهیم.

نقطه اول در زمان ۰/۵ ساعت (f = 1.41, F = 0.85)

نقطه دوم در زمان ۴ ساعت (f = 0.53, F = 3.58)

بنابراین با دو معادله و دو مجهول که از فرمول ۸-۵ بدست می‌آید A و B را بدست می‌آوریم

$$1.41 = \frac{A}{0.85} + B$$

$$0.53 = \frac{A}{3.58} + B$$

که از حل آن دو مقادیر A و B بدست می‌آید.

$A = 0.98\ cm^2/hr$

$B = 0.26\ cm/hr$

لذا معادله گرین ـ آمپت برای این حوضه بصورت زیر خواهد بود.

$$f = \frac{0.98}{F} + 0.26$$

بدین ترتیب رابطه بین سرعت نفوذ و نفوذ تجمعی بدست آمد. حال برای آنکه سرعت نفوذ و مقدار نفوذ را پس از ۶ ساعت از شروع بارندگی بدست آوریم باید به روش آزمون و خطا عمل کنیم. می‌دانیم که مطابق شکل ۸-۳ که نشان دهنده تیپ تغییرات سرعت نفوذ است مقدار سرعت نفوذ (f) پس از ۶ ساعت باید کمتر از مقدار آن پس از ۴ ساعت که برابر ۰/۵۳ سانتی‌متر در ساعت است، باشد. بنابراین در آزمون اول فرض می‌کنیم پس از ۶ ساعت سرعت نفوذ ۰/۴ سانتی‌متر در ساعت باشد در این صورت در فاصله بین ساعت ۴ و ۶ متوسط سرعت نفوذ ۰/۴۶۵ سانتی‌متر در ساعت خواهد بود زیرا:

$$\text{متوسط سرعت نفوذ} = \frac{0.53 + 0.4}{2} = 0.465\ cm/hr$$

باتوجه به این موضوع طی ۲ ساعت (از ساعت ۴ تا ۶) به اندازه ۰/۹۳۵ = ۰/۴۶۵×۲ سانتی‌متر آب در خاک نفوذ می‌کند که اگر با رقم ۳/۵۸ سانتی‌متر نفوذی که طی ۴ ساعت قبل صورت گرفته است جمع شود رقم کل نفوذ به ۴/۵۱ می‌رسد. در این صورت چون F = 4.51 می‌باشد با قرار دادن آن در معادله گرین ـ آمپت مقدار سرعت نفوذ (f) برابر ۰/۴۸ سانتی‌متردر ساعت محاسبه می‌شود.

$$f = \frac{0.98}{4.51} + 0.26 = 0.48\ cm/hr$$

چون عدد بدست آمده ۰/۴۸ است، اگر آن را با رقم فرض شده ۰/۴ مقایسه کنیم ملاحظه می‌شود که با آن متفاوت می‌باشد. حال برای f مقدار دیگری را انتخاب کرده و بهمین روش ادامه

می‌دهیم تا سرانجام آنچه برای f فرض شده است و آنچه از معادله گرین ـ آمپت بدست می‌آید مساوی شود. مثلاً اگر فرض کنیم که f = 0.47 باشد عدد محاسبه شده با معادله گرین- آمپت f = 0.474 خواهد بود که با آن مطابقت دارد. در این حالت برای F عدد ۴/۵۸ بدست می‌آید لذا جواب مسأله بصورت زیر خواهد بود.

$A = 0.98\ cm^2/hr$

$B = 0.26\ cm/hr$

$f = 0.47\ cm/hr$ (پس از ۶ ساعت)

$F = 4.58\ cm$ (پس از ۶ ساعت)

مزیت معادله گرین - آمپت نسبت به سایر معادله‌ها اساس فیزیکی آن است. اما با این وجود در هیدرولوژی معادلات تجربی دیگری برای برآورد نفوذ آب به داخل خاک بکار برده می‌شود که از میان آنها می‌توان معادله هورتن و معادله سازمان حفاظت خاک آمریکا (SCS) را نام برد.

معادله هورتون هورتون (Horton) باتوجه به تیپ کلی منحنی تغییرات سرعت نفوذ که در شکل ۸-۳ آمده است معادله کلی زیر را پیشنهاد نمود.

$$f = f_c + (f_o - f_c)e^{-kt} \qquad (۶-۸)$$

در این معادله:

f = سرعت نفوذ در هر لحظه

f_o = سرعت نفوذ در ابتدای شروع نفوذ

f_c = سرعت نهایی نفوذ، وقتی نفوذ نسبتاً ثابت شده باشد

k = عدد ثابتی که بسته به نوع خاک متغیر است

t = زمان از شروع نفوذ

با کمی تغییر در معادله فوق خواهیم داشت

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

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

$$\log(f - f_c) = \log(f_o - f_c) - kt \log e$$

$$\log(f - f_c) - \log(f_o - f_c) = -kt \log e$$

$$t = -\frac{1}{k \log e}[\log(f - f_c) - \log(f_o - f_c)]$$

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

اگر این معادله را با معادله کلی خط مستقیم $y = mx + C$ مقایسه کنیم خواهیم داشت:

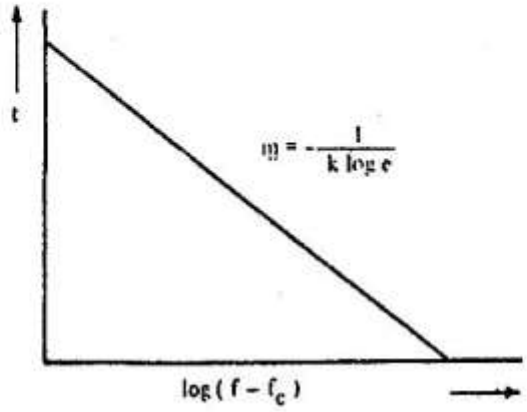
$$y = t$$

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

$x = \log(f - f_c)$

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

حال چنانچه t را نسبت به $\log(f - f_c)$ در یک دستگاه محور مختصات قائم رسم کنیم خط مستقیمی با شیب $m = -\frac{1}{k \log e}$ مطابق شکل ۸-۶ حاصل می‌شود. اگر در دو زمان مختلف دو



شکل ۸-۶ تغییرات $\log (f - f_c)$ نسبت به t

مقدار از f را بدانیم و f_c نیز معلوم باشد خواهیم توانست خط فوق را رسم کنیم و شیب آن را به دست آوریم تا معادلهٔ سرعت نفوذ مشخص شود. این موضوع در مثال زیر روشن شده است.

● مثال ۸-۳

در یک آزمایش نفوذپذیری خاک مقادیر سرعت نفوذ آب در طی ۲ ساعت آزمایش به صورت زیر بوده است.

زمان شروع آزمایش (دقیقه)	سرعت نفوذ (f) mm/hr
۰	۱۰۴
۱۵	۵۶
۳۰	۳۲
۴۵	۲۱
۶۰	۱۵
۷۵	۱۲
۹۰	۱۱
۱۰۵	۱۰
۱۲۰	۱۰

معادلهٔ سرعت نفوذ را به دست آورید.

حل

ملاحظه می‌شود که سرعت اولیهٔ نفوذ $f_o = 104$ mm/hr و سرعت نهایی نفوذ در حد $f_c = 10$ mm/hr ثابت شده است. حال به تشکیل جدول زیر می‌پردازیم.

t(min)	۰	۱۵	۳۰	۴۵	۶۰	۷۵	۹۰	۱۰۵	۱۲۰
f(mm/hr)	۱۰۴	۵۶	۳۲	۲۱	۱۵	۱۲	۱۱	۱۰	۱۰
$f - f_c$	۹۴	۴۶	۲۲۰	۱۱	۵	۲	۱	۰	۰
$\log (f - f_c)$	۱/۹۷	۱/۶۶	۱/۳۴	۱/۰۴	۰/۶۹	۰/۳۰	۰	-	-

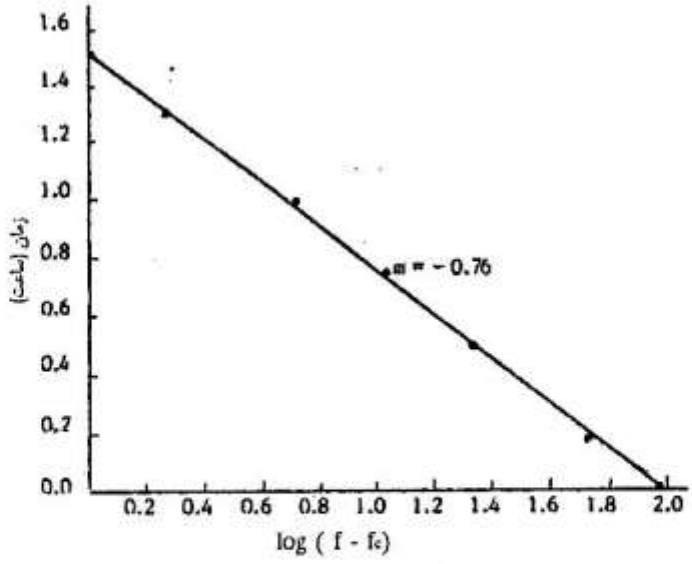
اگر در یک دستگاه محور مختصات t را در ستون عمودی و $\log(f - f_c)$ را در محور افقی قرار دهیم شکل ۸-۷ حاصل می‌شود. شیب این خط برابر است با:

$$m = -\frac{1}{k(0.434)} = -0.76 \quad \Rightarrow \quad -\frac{1}{k(0.434)} = -0.76 \quad \Rightarrow \quad k = 3.03$$

و معادلهٔ سرعت نفوذ به صورت زیر می‌باشد.

$$f = f_c + (f_o - f_c)e^{-kt} = 10 + (104 - 10)e^{-3.03t} = 10 + 94\ e^{-3.03t}$$

که در آن t زمان ازشروع‌نفوذ(ساعت)وf‌شدت‌نفوذ آب به داخل خاک (میلی‌متر در ساعت) است.



شکل ۸-۷

در معادله سرعت نفوذ که به صورت $f = f_c + (f_0 - f_c)e^{-kt}$ ارائه شد، k به وضعیت سطح زمین بستگی دارد. درخاکهای لخت مقدار k زیاد و در خاکهایی که پوشش گیاهی زیاد دارند k کوچک خواهد بود. مقادیر f_0 و f_c هم به نوع خاک و هم به نوع و تراکم پوشش گیاهی بستگی دارد. مثلاً در زمینهای شنی f_0 و f_c زیاد و در خاکهای رسی هر دو کوچک می‌باشند. در صورت وجود پوشش گیاهی در هر دو نوع خاک مقادیر f_0 و f_c افزایش می‌یابد. f_0 تابعی است از شیب زمین، درصد رطوبت اولیهٔ خاک و شدت بارندگی می‌باشد. اگر شدت بارندگی افزایش یابد مقدار f_0 افزایش می‌یابد.

اگر در حوضه هیچگونه اطلاعاتی از وضعیت نفوذپذیری در اختیار نباشد می‌توان ارقام جدول ۸-۲ را برای تخمین f_0، f_c و k به کار برد.

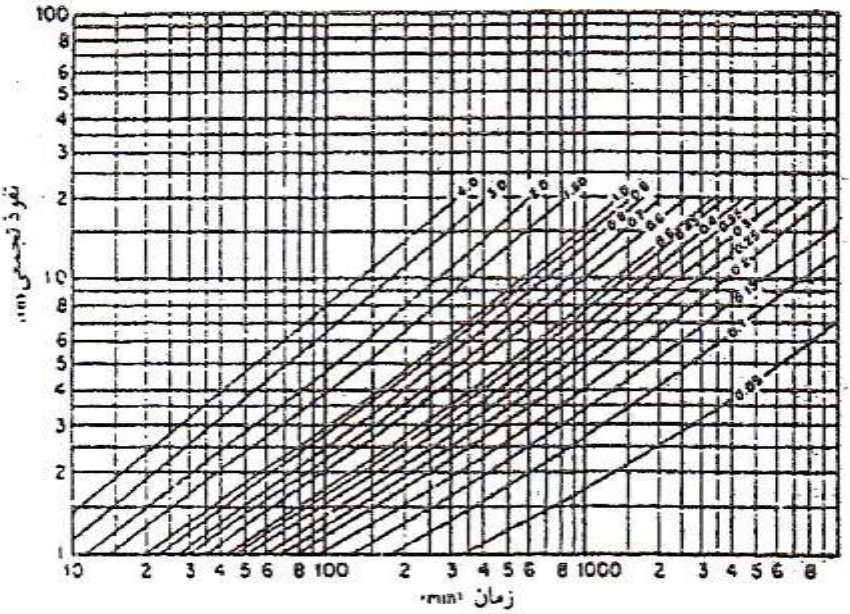
جدول ۸-۲ مقادیر k، f_0 و f_c در انواع خاکها

نوع خاک	f_0 mm/hr	f_c mm/hr	k min^{-1}
خاک معمولی کشاورزی (بدون پوشش گیاهی)	۲۸۰	۶ تا ۲۲	۱/۶
خاک معمولی کشاورزی (با پوشش گیاهی)	۹۰۰	۲۰ تا ۲۹۰	۰/۸
خاکهای آلی جنگلی	۳۲۵	۲ تا ۲۰	۱/۸
خاکهای شنی (لخت)	۲۱۰	۲ تا ۲۵	۲
خاکهای رسی (با پوشش گیاهی)	۶۷۰	۱۰ تا ۳۰	۱/۴

معادله SCS سازمان حفاظت خاک امریکا (Soil Conservation Services , SCS) معادله ساده‌ای را برای تعیین مقدارنفوذ تجمعی آب به داخل خاک ارائه نموده است که بنام معادله SCS معروف است. معادله مذکور بصورت زیر می‌باشد.

$$i = at^b + 0.6985 \qquad (۸-۷)$$

در این معادله i مقدار نفوذ تجمعی از شروع نفوذ (سانتی‌متر)، t زمان از شروع نفوذ (دقیقه) و a و b ضرایب مربوط به نوع خاک هستند . در هیدرولوژی برای بدست آوردن ضرایب این معادله معمولاً از **حلقه‌های نفوذ** که در سطح خاک قرار گرفته و میزان نفوذ در آن در زمانهای مختلف اندازه‌گیری می‌گردد استفاده می‌شود. چنانچه مقادیر آب نفوذ کرده در خاک را برای چند زمان مختلف در صحرا بدست آورده و مختصات این اندازه‌گیریها را روی نمودار ارائه شده توسط SCS (شکل ۸-۸) ببریم مشاهده خواهد شد که این نقاط با یکی از منحنی‌های شکل مذکور بیشتر برازش دارند. اگر عددی را که روی این منحنی نوشته شده است و به آن **شماره گروه منحنی نفوذ** (family curve number) گفته می‌شود یادداشت کنیم با داشتن این شماره و استفاده از جدول ۸-۳ مقادیر a و b بدست می‌آید. مثلاً چنانچه شماره منحنی نفوذ در یک خاک ۰/۴۵ باشد مقادیر $a = 0.113$ و $b = 0.7419$ خواهد بود. باید توجه داشت که برای استفاده از این نمودار



شکل ۸-۸ منحنی‌های شماره‌دار نفوذ برای استفاده در روش SCS.

جدول ۸-۳ ضرایب ثابت معادله نفوذ SCS نسبت به شماره منحنی نفوذ

شماره منحنی نفوذ	a	b
0.05	0.0533	0.6180
0.10	0.0620	0.6610
0.15	0.701	0.6834
0.20	0.0771	0.6988
0.25	0.0853	0.7107
0.30	0.925	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	0.1786	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

(شکل ۸-۸) باید مقدار نفوذ (F) که در صحرا اندازه‌گیری می‌شود برحسب اینچ و زمان برحسب دقیقه باشد. ضمناً اعداد نوشته شده روی منحنی‌ها نیز همان ظرفیت نفوذ یا **نفوذ نهایی** آب درآن خاک (بر حسب اینچ در ساعت) است. بعنوان مثال وقتی شماره منحنی نفوذ یک خاک ۰/۴۵ است بدین معنی خواهد بود که سرعت نهایی آب در این خاک ۰/۴۵ اینچ در ساعت (۱۱/۴۳ میلی‌متر در ساعت) است. پس از آنکه معادله نفوذ SCS بدست آمد می‌توان بامشتق‌گیری از آن معادله سرعت نفوذ آب در خاک را بدست آورد.

براساس پیشنهاد سازمان SCS در حوضه‌های آبریز، خاکها از نظر ظرفیت نفوذ آب به داخل خاک در چهار گروه هیدرولوژیک قرار می‌گیرند که عبارتند از:

-**گروه هیدرولوژیک** A - در این خاکها ظرفیت نهایی نفوذ آب در خاک بیش از ۷/۵ میلی‌متر در ساعت است.

-**گروه هیدرولوژیک** B - در این خاکها ظرفیت نهایی نفوذ آب در خاک بین ۳/۸ تا ۷/۵ میلی‌متر در ساعت است.

-**گروه هیدرولوژیک** C - در این خاکها ظرفیت نهایی نفوذ آب به داخل خاک کم و بین ۱/۲۵ تا ۳/۸ میلی‌متر در ساعت می‌باشد.

-**گروه هیدرولوژیک** D - در این خاکها ظرفیت نهایی نفوذ آب به داخل خاک بسیار کم و بین صفر تا ۱/۲۵ میلی‌متر در ساعت می‌باشد.

بعداً مشاهده خواهد شد که این گروه بندی در محاسبه رواناب سطحی نقش زیاد دارند.

● **مثال ۸-۴**

شماره منحنی نفوذ یک خاک پس از آزمایش به روش SCS برابر ۰/۵ بدست آمده است معادلات نفوذ تجمعی و سرعت نفوذ را بدست آورید. در صورتی که بارانی به مدت ۳ ساعت روی این خاک ببارد و شدت آن بیش از سرعت نفوذ آب در خاک باشد اوّلاً در این مدت چه مقدار آب در خاک نفوذ می‌کند ثانیاً سرعت نفوذ آب در این خاک در انتهای بارندگی چقدر است. خاکهای این حوضه را از نظر گروه هیدرولوژیک در چه مکانی قرار می‌دهید.

حل

از روی جدول ۸-۲ به ازاء شماره منحنی نفوذ ۰/۵ خواهیم داشت:

$a = 0.1196$

$b = 0.7475$

بنابراین معادله نفوذ تجمعی بصورت زیر است.

$$i = at^b + 0.6985$$

$$i = 0.1196\, t^{0.7475} + 0.6985$$

که با مشتق‌گیری از آن معادله سرعت نفوذ بصورت زیر می‌باشد.

$$I = 0.0894\ t^{-0.2525}$$

لذا پس از ۳ ساعت (۱۸۰ دقیقه) مقدار نفوذ تجمعی ۶/۵ سانتی‌متر می‌باشد زیرا:

$$i = 0.1196(180)^{0.7475} + 0.6985$$

$$i = 6.5\ cm$$

و سرعت نفوذ ۱۴/۴ میلی‌متر در ساعت است زیرا:

$$I = 0.0894(180)^{-0.2525}$$

$$I = 0.0241\ cm/min$$

$$I = 1.44\ cm/hr$$

$$I = 14.4\ mm/hr$$

باتوجه به این که شماره منحنی نفوذ ۰/۵ می‌باشد بدین معنی است که سرعت نهایی نفوذ آب در خاک ۰/۵ اینچ در ساعت (۱۲/۵ میلی‌متر در ساعت) می‌باشد لذا مشاهده می‌شود که پس از ۳ ساعت بارندگی، نفوذپذیری خاک (۱۴/۴) هنوز بیشتر از ظرفیت نفوذنهایی (۱۲/۵) می‌باشد. یعنی وضعیت هنوز به نفوذ نهایی نرسیده است. بنابراین نظر به ظرفیت نفوذ بالای خاک (بیشتر از ۷/۵ میلی‌متر در ساعت) گروه هیدرولوژیک خاکهای حوضه A می‌باشد.

در حوضه‌های آبریز معمولاً فقط نفوذ تجمعی یعنی مجموع ارتفاع آبی که از ابتدای قرار گرفتن آب در سطح خاک در زمین نفوذ می‌کند اندازه‌گیری می‌شود و همانطور که گفته شد از روی معادله تغییرات نفوذ تجمعی نسبت به زمان معادله سرعت نفوذ در هر لحظه از زمان محاسبه می‌شود. یکی از ایرادهایی که به معادله SCS گرفته می‌شود این است که جزء ثابت معادله یعنی ۰/۶۹۸۵ نیز عدد ثابتی نبوده و در واقع معادله نفوذ باید حالت کلی زیر را داشته باشد.

$$y = at^{\alpha} + b \qquad (۸-۸)$$

که در آن a، α و b بستگی به نوع خاک و وضعیت پوشش آن داشته و می‌بایست با انجام آزمایش اندازه‌گیری شوند.

۸-۲-۴ اندازه‌گیری نفوذ

برای اندازه‌گیری نفوذ تجمعی و یا سرعت نفوذ در صحرا از وسیلهٔ ساده‌ای به نام نفوذسنج استفاده می‌شود. دستگاه نفوذسنج از دو حلقهٔ استوانه‌ای به قطرهای ۳۰ و ۶۰ سانتیمتر و ارتفاع ۲۵ سانتیمتر تشکیل شده است. البته ممکن است از اندازه‌های دیگر نیز استفاده شود. حلقه‌ها از فلز و به ضخامت ۲ میلی‌متر انتخاب می‌شوند. ابتدا حلقهٔ کوچک روی زمین قرار داده می‌شود و

طوری در خاک کوبیده می‌شود که حدود ۱۰ سانتی‌متر در آن فرو رود. سپس حلقهٔ بزرگتر طوری قرار داده می‌شود که حلقه کوچک بصورت متحدالمرکز در داخل آن قرار گیرد و بهمان ترتیب در زمین کوبیده می‌شود. لذا بین دو حلقهٔ ۱۵ سانتی‌متر فاصله است. بین دو حلقه و همچنین داخل حلقهٔ کوچک آب ریخته می‌شود.

پایین رفتن سطح آب استوانهٔ داخلی نسبت به زمان مرتب اندازه‌گیری می‌شود. این تغییرات را می‌توان از طریق افزودن حجم مشخصی از آب به داخل استوانه در زمان معین اندازه‌گیری کرد. اضافه کردن آب به داخل سیلندر طوری صورت می‌گیرد که عمق آب در داخل سیلندر کوچک از لبهٔ آن بین ۷ تا ۱۲ سانتی‌متر فاصله داشته باشد. آبی که بین استوانهٔ داخلی و خارجی ریخته می‌شود فقط برای کنترل حرکت عمودی آب در استوانهٔ داخلی است تا از حرکات جانبی آن که ممکن است موجب اشتباه در آزمایش شود، جلوگیری گردد و هیچگونه اندازه‌گیری روی آن صورت نمی‌گیرد.

با اندازه‌گیری افت سطح آب یا ارتفاع آبی که در زمین نفوذ می‌کند (i) نسبت به زمان (t) می‌توان رابطهٔ ریاضی بین i و t را با روش ساده‌ای که به روش دونقطه‌ای معروف است، به دست آورد. برای روشن شدن مطلب به ذکر یک مثال می‌پردازیم.

● **مثال ۸-۵**

در یک آزمایش نفوذپذیری با حلقه‌های مضاعف که ۹۰ دقیقه طول کشیده است ارتفاع آبی که در زمین نفوذ کرده است از شروع آزمایش در دقایق ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۵، ۶۰ و ۹۰ به ترتیب ۱/۷، ۲/۷، ۳/۶، ۵/۱، ۸/۸ و ۱۱/۸ سانتی‌متر بوده است. به عبارت دیگر پس از ۹۰ دقیقه ارتفاع کل آب نفوذی ۱۱/۸ سانتی‌متر است. رابطهٔ بین نفوذ تجمعی (i) و سرعت نفوذ (I) را نسبت به زمان به دست آورید.

زمان (t)، دقیقه	ارتفاع آب نفوذ یافته i (mm)
۰	۰
۵	۱۷
۱۰	۲۷
۱۵	۳۶
۲۵	۵۱
۶۰	۸۸
۹۰	۱۱۸

حل

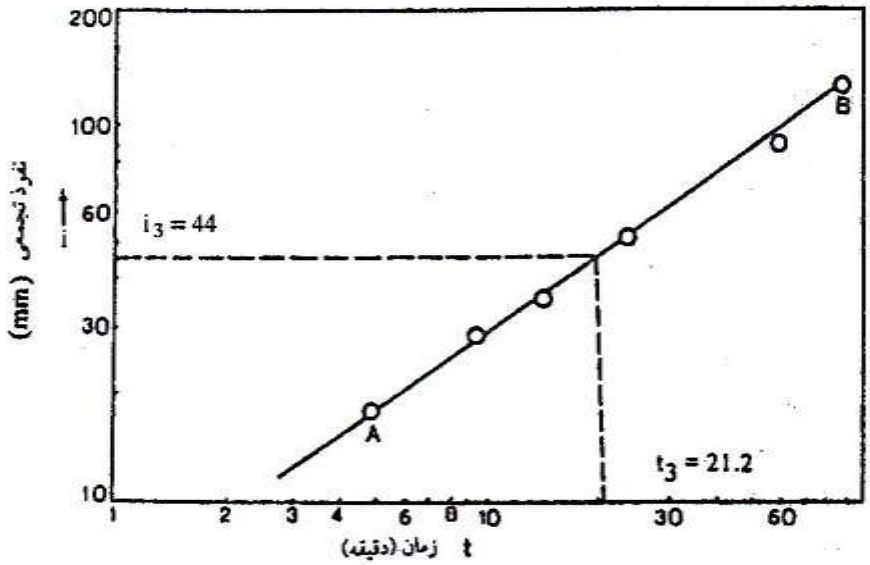
چنانچه نقاطی را که مختصات آنها t و i است در یک دستگاه محور مختصات لگاریتمی

رسم کنیم خطی مشابه شکل ۸-۹ حاصل می‌شود. معادلهٔ نفوذ به صورت $i = at^{\alpha} + b$ بوده و برای مشخص کردن آن کافی است ضرایب a، α و b را به دست آوریم. برای این منظور به ترتیب عملیات زیر را انجام می‌دهیم.

(۱)- روی خط رسم شده دو نقطه را در ابتدا (A) و انتهای آن (B) است اختیار می‌کنیم و مختصات آن دو را مشخص می‌نماییم.

$A(t_1 , i_1) = 5.0, 17$

$B(t_2 , i_2) = 90, 118$



شکل ۸-۹

۲- میانگین هندسی t_1 و t_2 را از معادلهٔ زیر محاسبه کنید و به ازای آن i_3 را از روی نمودار به دست آورید.

$t_3 = \sqrt{t_1.t_2}$

$t_3 = \sqrt{(5 \times 90)} = 21.2$

$i_3 = 44$

۳- مقدار b از معادلهٔ زیر محاسبه می‌شود.

$$b = \frac{(i_1)(i_2) - (i_3)^2}{i_1 + i_2 - 2(i_3)}$$

$$b = \frac{(17)(118) - (44)^2}{17 + 118 - 2 \times 44} = 1.49$$

۴- برای محاسبهٔ α رابطهٔ $i - b = at^{\alpha}$ را مورد استفاده قرار دهید.

$$i - b = at^{\alpha}$$

$$i - 1.49 = at^{\alpha}$$

مختصات دو نقطه از خط را در معادلهٔ فوق قرار دهید.

به ازای $t = 10$ و $i = 27$

$$27 - 1.49 = a(10)^{\alpha}$$

به ازای $t = 21.2$ و $i = 44$

$$44 - 1.49 = a(21.2)^{\alpha}$$

اگر دو معادله بالا را برهم تقسیم کنیم $\alpha = 0.68$ به دست می‌آید که با استفاده از یکی از معادلات مذکور مقدار $a = 5.3$ محاسبه می‌شود بنابراین پارامترهای معادله عبارتند از:

$$b = 1.49$$

$$a = 5.3$$

$$\alpha = 0.68$$

و معادله نفوذ عبارت خواهد بود از $i = 5.3\, t^{0.68} + 1.49$ که در آن t بر حسب دقیقه و i برحسب میلی‌متراست. سرعت نفوذ در هر لحظه عبارت است از مشتق معادلهٔ فوق. لذا:

$$I = \frac{di}{dt} = 5.3 \times 0.68\, t^{0.68 - 1} = 3.6\, t^{-0.32}$$

که در آن t برحسب دقیقه و I برحسب میلی‌متر در دقیقه است:

● مثال ۸-۶

برای اندازه‌گیری نفوذ از یک دستگاه نفوذ سنج حلقه‌ای که قطر داخلی آن ۳۰ سانتی‌متر می‌باشد استفاده شده است. مقدار نفوذ تجمعی در زمانهای مختلف اندازه‌گیری و نتایج زیر بدست آمده است. منحنی ظرفیت نفوذ نسبت به زمان را رسم کرده و مقدار ظرفیت نهائی نفوذ را بدست آورید.

زمان (min)	0	2	5	10	16	30	50	80	120	150
حجم نفوذ تجمعی (ml)	0	130	280	510	680	900	1040	1190	1280	1343

حل

با توجه به سطح دستگاه نفوذ سنج که برابر ۷۰۶/۵ سانتی‌متر مربع می‌باشد؛

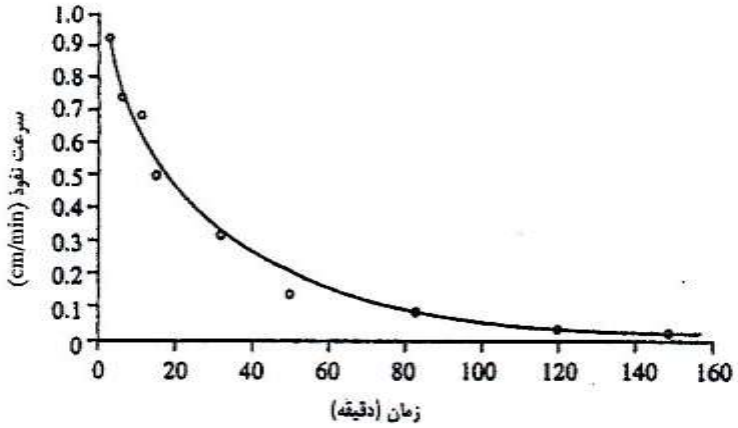
$$A = \frac{\pi}{4} d^2$$

$$A = \frac{3.14}{4} (30)^2$$

$$A = 706.5\ cm^2$$

حل مسأله در جدول زیر ارائه و سپس منحنی تغییرات سرعت نفوذ (ستون ۶) نسبت به زمان (ستون ۱) رسم شده است.

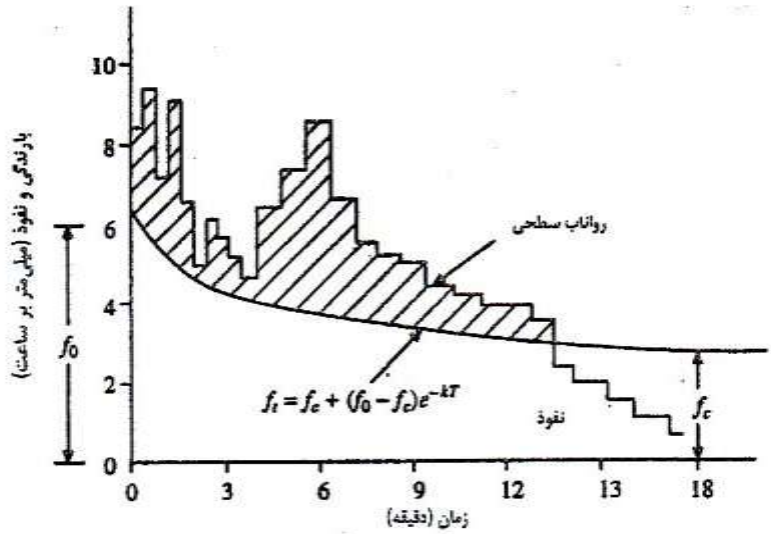
زمان (min)	فاصله‌زمانی (min)	حجم آب اضافه شده ml	عمق آب اضافه شده ستون ۳ بخش بر مساحت تجمعی (cm)	عمق آب اضافه شده در هر دوره زمانی (cm)	سرعت نفوذ (سانتی‌متر در دقیقه)=۱۰ ضربدر (ستون ۵) بخش بر (ستون ۲)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
0	0	0	0	0	0
2	2	130	0.184	0.184	0.92
5	3	280	0.396	0.212	0.71
10	5	510	0.722	0.326	0.65
20	10	680	0.962	0.240	0.40
30	10	900	1.274	0.312	0.31
50	20	1040	1.472	0.198	0.10
80	30	1190	1.684	0.212	0.07
120	40	1280	1.811	0.127	0.03
150	30	1343	1.901	0.94	0.03



۸-۲-۵ استفاده از منحنی نفوذ

معمولاً شدت بارندگی در طول مدت بارش مرتب در حال تغییر بوده و کم و زیاد می‌شود. بطوری که گاهی اوقات مقدار آن از سرعت نفوذ آب در خاک زیادتر و برخی اوقات کمتر از آن است. اگر منحنی تغییرات سرعت نفوذ آب در خاک و تغییرات شدت بارندگی در طول مدت بارش را روی یک دستگاه محور مختصات رسم کنیم شکلی مشابه ۸-۱۰ خواهیم داشت.

بخشی از بارندگی که در قسمت بالای نفوذ قرار می‌گیرد به صورت رواناب درمی‌آید و در سطح زمین جاری خواهد شد. در شکل ۸-۱۰ بارندگی در اکثر اوقات بیشتر از ظرفیت نفوذ بوده و لذا منحنی نفوذ شکل طبیعی خود را دارد ولی اگر شدت بارندگی طوری کم و زیاد شود



شکل ۸-۱۰ منحنی تغییرات سرعت نفوذ آب در خاک و تغییرات شدت بارندگی در طول بارش

که از ظرفیت نفوذ کمتر یا بیشتر شود مسلماً در شکل منحنی ظرفیت نفوذ هم تغییراتی بوجود خواهد آمد و ممکن است حالاتی وجود داشته باشد که بخشی از نمودار ستونی بارندگی زیر منحنی نفوذ قرار گیرد که در آن مقطع زمانی رواناب وجود نخواهد داشت.

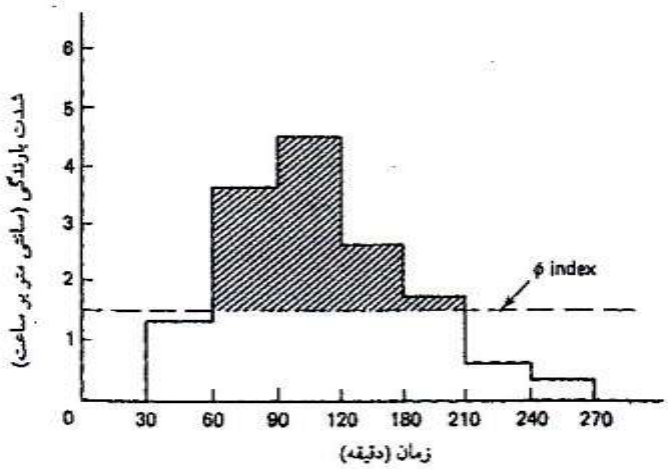
۸-۳ نمایه‌های نفوذ

در حوضه‌های آبریز معمولا به دلیل بزرگی مساحت و تغییرات شدیدی که در ظرفیت نفوذ خاکهای نواحی مختلف آن مشاهده می‌شود از شاخص‌های ساده‌ای به نام **نمایه‌های نفوذ** (infiltration indices) استفاده می‌شود. روش نمایه نفوذ ساده‌ترین روش برای تخمین حجم کل رواناب است. هدف این روش آن است که ضریبی را بدست آوریم تا بتوان آن را برای تمام مدت بارش و یا تمام دوره بارندگی که مرکب از چند بارش می‌باشد، بکار برده و رواناب مستقیم را بدست آوریم. نمایه یا شاخص نفوذ معیاری است که مقدار آن در طول مدت بارندگی ثابت است و نشان‌دهندهٔ نفوذپذیری خاکهای حوضه است. نمایه‌های مهمی که در هیدرولوژی کاربرد دارند عبارتند از **نمایه Φ** و **نمایه W**.

۸-۳-۱ نمایه Φ (Φ -index)

نمایه Φ عبارت است از مقدار متوسطی از تلفات آب در طول بارندگی به نحوی که بالاتر از این مقدار تمام بارندگی اضافی به رواناب تبدیل شود. مفهوم نمایه Φ در شکل ۸-۱۱ نشان داده شده است. در این شکل بالاتر از ۱/۵ میلی‌متر بر ساعت تمام بارش به رواناب تبدیل می‌شود.

مثلاً اگر باران با شدت ۲ میلی‌متر بر ساعت ریزش کند ۰/۵ میلی‌متر بر ساعت اضافی (۰/۵=۱/۵-۲) به ۰، اناب مبدل می‌شود.



شکل ۸-۱۱ نمایش تصویری نمایه Φ

برای پیدا کردن نمایه Φ ابتدا حجم رواناب را از روی هیدروگراف جریان سطحی (سیل) بدست آورده و از کل مقدار بارندگی کسر می‌کنیم. سپس اختلاف این دو بطور یکنواخت بر طول مدت بارندگی تقسیم می‌گردد. اما توصیه می‌شود که بجای در نظر گرفتن مدت کل بارندگی برای محاسبه نمایه Φ مقدار کل آب نفوذ شده در خاک بر مدت مؤثر بارندگی (effective rainfall period) تقسیم می‌شود. چون نمایه Φ نمایانگر تأثیر توأم نفوذ، برگاب و ذخیره سطحی است لذا مقدار آن برابر است با متوسط تغذیه‌ای که در مدت بارندگی در سطح حوضه صورت می‌گیرد.

● **مثال ۸-۷**

در یک حوضه آبریز به وسعت ۵۰۰ هکتار بارانی بمدت ۱۵۰ دقیقه رخ داده است. شدت‌های بارندگی در دوره‌های ۳۰ دقیقه‌ای به ترتیب ۴/۵، ۳، ۲، ۳/۵ و ۲ سانتی‌متر در ساعت بوده است. حجم رواناب حاصله از این بارندگی ۱۶۹۰۰۰ متر مکعب بوده است. نمایه Φ را برای این حوضه بدست آورید.

حل

الف – مقدار بارندگی در طول دوره بارش را بدست می‌آوریم

$$\text{مقدار بارندگی} = (4.5+3+2+3.5+2)\left(\frac{30}{60}\right) = \text{مقدار بارندگی}$$

$$\text{مقدار بارندگی} = 7.5 \text{ cm}$$

مقدار بارندگی =0.075 m

ب – حجم بارندگی را محاسبه می‌کنیم

حجم بارندگی =(0.075)(500)(10000)=375000 m^3

ج – حجم رواناب ۱۶۹۰۰۰ متر مکعب است.

د – حجم آب در زیر نمایه Φ تفاصل بارندگی و رواناب است

375000-169000=206000 m^3

هـ – عمق آب نفوذ شده در خاک برابر است با:

$$\frac{206000}{(500)(10,000)}=0.0412 \text{ m} = 4.12 \text{ cm}$$

و – نمایه Φ بر حسب سانتی‌متر در ساعت عبارت خواهد بود از:

$$\Phi \text{ نمایه} = (4.12)\left(\frac{1}{150}\right)(60)$$

$$= 1.64 \text{ cm/hr}$$

● **مثال ۸–۸**

با استفاده از نمایه Φ که در مثال قبل محاسبه شد رواناب حاصله از بارندگی ۷۰ دقیقه‌ای زیر را بدست آورید.

زمان (دقیقه)	شدت بارندگی (سانتی‌متر در ساعت)
0 - 10	0.5
10 - 20	2.0
20 - 30	6.5
30 - 40	5.0
40 - 50	0.9
50 - 60	2.0
60 - 70	3.0

حل

الف – شدت‌های رواناب را محاسبه می‌کنیم:

شدت رواناب = شدت بارندگی – Φ_{index}

در این صورت شدت‌های رواناب برابر خواهد بود با:

زمان (دقیقه)	شدت رواناب (سانتی‌متر در ساعت)
0 - 10	0.5 – 1.64 = 0
10 - 20	2.0 – 1.64 = 0.36
20 - 30	6.5 – 1.64 = 4.86
30 - 40	5.0 – 1.64 = 3.36
40 - 50	0.9 – 1.64 = 0.26
50 - 60	2.0 – 1.64 = 0.36
60 - 70	3.0 – 1.64 = 1.36

ب - ارتفاع رواناب را محاسبه می‌کنیم

$$\text{ارتفاع رواناب} = (0.36)(\frac{10}{60}) + (4.86)(\frac{10}{60}) + (3.36)(\frac{10}{60}) + (0.36)(\frac{10}{60}) + (1.36)(\frac{10}{60})$$

$$= (10.3)(\frac{10}{60}) = 1.71 \text{ cm}$$

● **مثال ۸-۹**

مقادیر بارندگی در یک حوضه به مساحت ۳۷۵ کیلومتر مربع در هر ساعت مطابق جدول زیر بوده است. اگر ارتفاع رواناب حاصله از آن ۳/۵۸ سانتی‌متر باشد، نمایه Φ چقدر است؟

ساعت	ارتفاع بارندگی cm
۹-۱۰	۱/۰۲ سانتی‌متر
۱۰-۱۱	۱/۵ سانتی‌متر
۱۱-۱۲	۳/۶۸ سانتی‌متر
۱۲-۱۳	۱/۶ سانتی‌متر
۱۳-۱۴	۲/۶ سانتی‌متر
۱۴-۱۵	۱/۵ سانتی‌متر
جمع	۱۱/۹

حل

زمان بارندگی از ساعت ۹ تا ساعت ۱۵ به مدت ۶ ساعت بوده است. چون مقدار رواناب ۳/۵۸ سانتی‌متر و بارندگی ۱۱/۹ سانتی‌متر می‌باشد بدون در نظر گرفتن تلفات تبخیر مقدار نفوذ برابر است با:

$$P - Q = 11.9 - 3.58 = 8.32 \text{ cm}$$

و متوسط نفوذ یا نمایه Φ می‌بایست در حدود ۱/۳۶ سانتی‌متر باشد زیرا:

$$\Phi = \frac{8.32}{6} = 1.36 \text{ cm/h}$$

چون مطمئن نیستیم که در تمام مدت ۶ ساعت مقدار باران بیش از سرعت نفوذ بوده است لذا جواب مسأله را به ازاء مقادیر مختلف Φ کنترل می‌کنیم. ابتدا Φ را برابر ۱/۳۹ و سپس ۱/۴۶ انتخاب کرده و مقادیر رواناب را محاسبه می‌کنیم.

محاسبه مقادیر رواناب به ازاء مقادیر مختلف Φ

ساعت	بارندگی cm	بارندگی اضافی (رواناب) به ازاء مقادیر مختلف Φ	
		Φ = 1.39 (ستون دوم) ـ 1.39	Φ = 1.46 (ستون دوم) ـ 1.46
1	2	3	4
9-10	1.02	-	-
10-11	1.50	0.11	0.04
11-12	3.68	2.29	2.22
12-13	1.60	0.21	0.14
13-14	2.60	1.21	1.14
14-15	1.50	0.11	0.04
	11.90	3.93	3.58

مشاهده می‌شود که در مورد دوم مقدار رواناب محاسبه شده ۳/۵۸ سانتی‌متر معادل مقدار اندازه‌گیری شده رواناب است لذا Φ = 1.46 جواب مسأله می‌باشد.

● **مثال ۸-۱۰**

نمایه Φ را برای بارانی با مشخصه زیر بدست آورید

زمان بارش (hr)	15	18	21	24	03	06
بارندگی (cm)		1.2	1.5	0.9	2.2	0.2

وسعت حوضه = ۴۳۰ کیلومتر مربع

حجم رواناب = ۱۰/۷۵ میلیون مترمکعب

حل

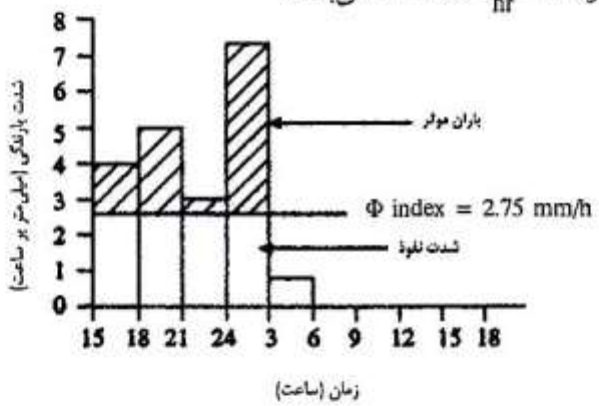
ابتدا عمق رواناب را محاسبه می‌کنیم.

$$\text{عمق رواناب} = \frac{(10.75 \times 10^6 \times 100)}{(430 \times 10^6)} = 2.5 \text{ cm} = 25 \text{ mm}$$

سپس جدول زیر را تشکیل می‌دهیم.

دوره زمانی	عمق بارندگی (mm)	شدت بارندگی (mm/h)	بارش اضافی با فرض Φ = 2.8 mm/h [(ستون ۳منهای ۲/۸ ضربدر ۳)]	بارش اضافی با فرض Φ = 2.75 mm/h [(ستون ۳منهای ۲/۷۵ ضربدر ۳)]
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
15-18	12	4	3.6	3.75
18.21	15	5	6.6	6.75
21-24	9	3	0.6	0.75
0-3	22	7.33	13.6	13.75
3-6	2	0.67	-	
			24.4	25

بطوریکه ملاحظه می‌شود اگر Φ = 2.75 باشد مقدار رواناب محاسبه شده با اندازه‌گیری شده برابر خواهد بود. لذا $\Phi = 2.75 \frac{mm}{hr}$ می‌باشد.



شکل ۸-۱۲

● مثال ۸-۱۱

بارانی‌به مدت ۸ ساعت و به میزان ۲۰ سانتی‌متر روی حوضه‌ای ریزش نموده و مقدار رواناب اندازه‌گیری شده در این حوضه ۱۱/۶ سانتی‌متر بوده است. با توجه به مقدار بارندگی در ساعات مختلف که به شرح زیر می‌باشد نمایه Φ را محاسبه کنید

زمان (ساعت)	1	2	3	4	5	6	7	8
مقدار بارندگی در هر ساعت (سانتی‌متر)	0.8	1.8	3.0	4.6	3.6	3.2	2.0	1.0

حل

مقدار نفوذ آب در خاک برابر است با

$20 - 11.6 = 8.4$ cm

حل مسأله بر این اساس استوار است که دوره بارندگی مؤثر را بصورت آزمون و خطا بدست آوریم. در ابتدا فرض می‌کنیم که تمام این ۸ ساعت در رواناب موثر بوده‌اند در این صورت نمایه – Φ برابر خواهد بود:

$\Phi\text{-index} = (8.4)/(8) = 1.05$ cm/h

چنانچه نمایه Φ را برابر ۱/۰۵ در نظر بگیریم مقدار محاسبه شده رواناب برابر خواهد بود با:

زمان (ساعت)	بارندگی (cm)	نمایه – Φ	رواناب (cm)
1	0.8	1.05	0
2	1.8	1.05	0.75
3	3.0	1.05	1.95
4	4.6	1.05	3.55
5	3.6	1.05	2.55
6	3.2	1.05	2.15
7	2.0	1.05	0.95
8	1.0	1.05	0
جمع	20		11.9

مشاهده می‌شود که در این صورت مقدار رواناب ۱۱/۹ سانتی‌متر بدست می‌آید که با رقم ۱۱/۶ سانتی‌متر اندازه‌گیری شده متفاوت است. بنابراین لازم است نمایه– Φ تعدیل شود. حال فرض می‌کنیم که زمان بارندگی موثر ۶ ساعت باشد در این صورت فرصت وقوع رواناب را از اولین و هشتمین ساعت حذف می‌کنیم. در این صورت مقدار نفوذ آب در خاک برابر خواهد بود با:

$20 - (0.8 + 1.0) - 11.6 = 6.6$ cm

$\Phi\text{–index} = (6.6)/(6) = 1.1$ cm/h

حال اگر نمایه – Φ را برابر ۱/۱ سانتی‌متر در نظر بگیریم و محاسبات را تکرار کنیم مشاهده خواهد شد که مقدار رواناب محاسبه شده و اندازه‌گیری شده برابر خواهند شد.

در مثال‌های فوق ملاحظه گردید که بدست آوردن نمایه – Φ یک کار آزمون و خطا است و باید آنقدر محاسبات را تکرار کنیم که برای Φ عدد مناسبی بدست آید. بطور کلی برای بدست

آوردن نمایه -Φ باید بصورت زیر عمل شود.

۱- یک بارندگی راکه بتواند رواناب ایجاد نماید انتخاب کنید.

۲- داده‌های مربوط به این باران را از روی باران نگار استخراج کنید. به نحوی که بتوان مشخص کرد که در هر دوره زمانی چقدر بارش وجود داشته است.

۳- داده‌های رواناب مربوط به این باران را نیز جمع‌آوری کنید به نحوی که بتوان مشخص کرد در هر دوره زمانی چقدر رواناب وجود داشته است.

۴- از روی حجم رواناب ناشی از بارندگی و با تقسیم آن بر سطح حوضه ارتفاع رواناب را بدست آورید. توجه شود که اگر از قبل جریان پایه وجود داشته است آن را از رواناب کسر کنید.

۵- متوسط بارندگی روی منطقه را بدست آورید.

۶- در صورتی که داده‌های باران‌نگاری وجود نداشته باشد و تنها جمع بارندگی در طول مدت بارش در اختیار باشد با روش‌های ممکن و از روی تیپ منحنی‌های توزیع مقدار بارندگی در طول بارش مقدار و شدت بارش را در هر دوره زمانی بدست آورید.

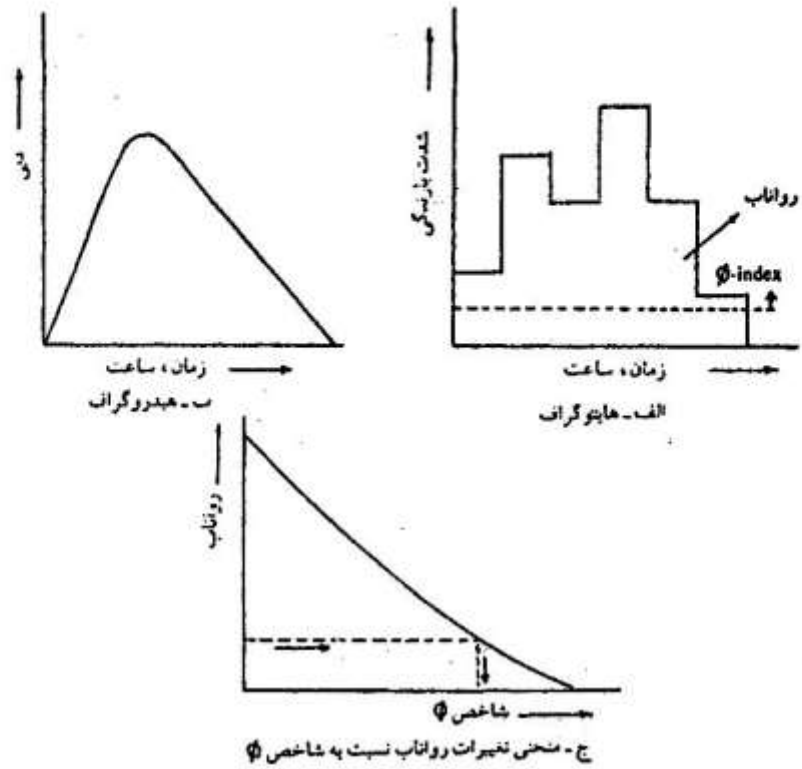
۷- هیستوگرام بارندگی را برای هر دوره زمانی رسم کنید.

۸- مقداری را برای نمایه -Φ بر حسب میلی‌متر در ساعت حدس بزنید و بر اساس آن بارش اضافی راکه به رواناب تبدیل می‌شود بدست آورید و مقدار بدست آمده را با رواناب واقعی (بند ۴) مقایسه کنید.

۹- اگر بارش اضافی بیشتر از رواناب باشد مقداری راکه برای نمایه -Φ انتخاب کرده‌اید افزایش دهیدوسپس‌بندقبلی‌را اجرانماییدتازمانی‌که‌بارش اضافی با انتخاب صحیح -Φ برابر رواناب گردد.

راه حل ساده‌تر برای بدست آوردن نمایه -Φ آنست که ابتدا تغییرات شدت بارندگی نسبت به زمان و هیدروگراف (شکل ۸-۱۳) حاصله از آن باران یعنی رابطه رواناب نسبت به زمان را در دست داشته باشیم. ابتدا از روی هایتوگراف (شکل ۸-۱۳ الف) به ازاء مقادیر فرضی نمایه -Φ مقدار رواناب را محاسبه کرده و تغییرات رواناب نسبت به مقادیر Φ را در یک دستگاه محور مختصات رسم می‌کنیم (شکل ۸-۱۳ ج) سپس با داشتن هیدروگراف حجم کل رواناب (سطح زیر منحنی هیدروگراف) و از تقسیم آن بر سطح حوضه ارتفاع رواناب را بدست می‌آوریم. آنگاه ارتفاع رواناب را روی منحنی ج برده تا مقدار نمایه -Φ بدست آید.

طرز تهیه نمایه -Φ برای یک باران مشخص فرضی در شکل ۸-۱۳ نشان داده شده است. توجه شود که نمایه‌ای که بدین‌گونه بدست می‌آید تنها برای همین بارندگی صادق خواهد بود و نمی‌توان آن را برای تمام بارندگی‌ها عمومیت داد.



شکل ۸-۱۳ تعیین نمایه -Φ با استفاده از هایتوگراف بارندگی و هیدروگراف جریان حاصل از بارش (۱)- از روی‌هایتوگراف، به‌ازاء مقادیر مختلف -Φ رواناب برحسب سانتی‌متر تعیین و شکل ج رسم می‌شود. (۲)- از روی هیدروگراف رواناب حاصله از بارندگی برحسب سانتی‌متر تعیین می‌شود. (۳)- با داشتن رواناب از منحنی ج نمایه -Φ بدست‌آمده و مقدار آن در منحنی الف ـ مشخص می‌شود.

● مثال ۸-۱۲

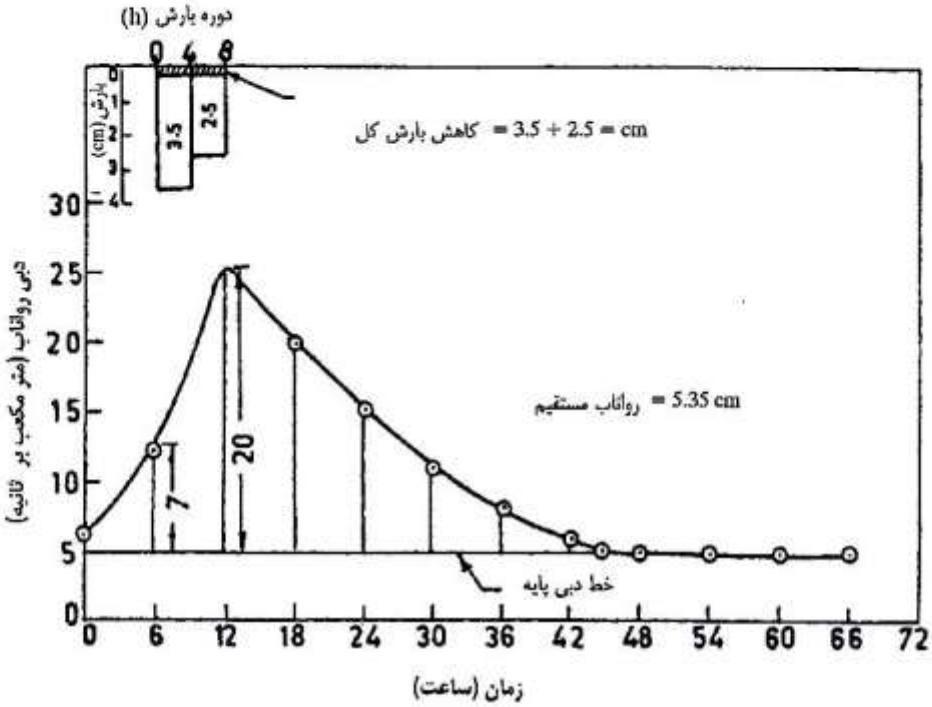
در یک حوضه آبریز که مساحت آن ۲۵ کیلومتر مربع است دو باران ۴ ساعته پشت سر هم اتفاق می‌افتد که مقدار بارش آن‌ها به ترتیب ۳/۵ و ۲/۵ سانتی‌متر است. این دو باران روانابی را ایجاد می‌کنند که طی ۶۶ ساعت اندازه‌گیری دبی سیل حاصله عبارت بوده است از:

زمان از شروع باران (h)	0	6	12	18	24	30	36	42	48	54	60	66
دبی سیل (m^3/s)	6	12	25	20	18	11	8	6	5	5	4.5	4.5

چنانچه دبی پایه رودخانه قبل از شروع سیل ۵ متر مکعب در ثانیه بوده باشد و در تمام مدت سیل این دبی وجود داشته باشد مقدار رواناب حاصله از این بارش‌ها چقدر بوده است و نمایه نفوذ Φ در این حوضه چقدر است.

حل:

اگر تغییرات دبی رودخانه را نسبت به زمان رسم کنیم شکلی مشابه زیر خواهد داشت.



با در نظر گرفتن خط مستقیم دبی پایه که باید مقدار آن را از دبی سیل کسر نمود آنچه بالاتر از این خط قرار می‌گیرد رواناب مستقیم حاصل از بارش‌ها می‌باشد با سطح محصور بین این خط و منحنی نشان داده شده است. سطح محصور شده به روش ذوزنقه قابل محاسبه است.

$$\text{حجم رواناب مستقیم} = \frac{1}{2} \times (60 \times 60 \times 6)\,[(1+7)+(7+20)+(20+15)+(15+10)+(10+6)+(6+3)+(3+1)]$$

$$\text{حجم رواناب مستقیم} = 1.3392 \times 10^6\ \text{m}^3$$

ارتفاع رواناب برابر است با:

$$\text{ارتفاع رواناب} = \frac{1.3392 \times 10^6}{\text{سطح حوضه}} = \frac{1.3392 \times 10^6}{25 \times 10^6} = 0.05356\ \text{m} = 5.35\ \text{cm}$$

مقدار کل بارش طی ۸ ساعت برابر است با:

$$\text{مقدار کل بارش} = 3.5 + 2.5 = 6.0\ \text{cm}$$

مقدار کسر شده به دلیل نفوذ:

رواناب - بارش = مقدار کسر شده

مقدار کسر شده =6.0 - 5.35

مقدار کسر شده = 0.65 cm

مقدار نفوذ طی ۸ ساعت ۰/۶۵ سانتی‌متر و در هر ساعت برابر خواهد بود با:

$$\phi_{index} = \frac{0.65}{8} = 0.08125 \text{ cm/h}$$

● مثال ۸-۱۳

بارانی به مدت ۱۴ ساعت روی حوضه‌ای به مساحت ۲۵ کیلومتر مربع ریزش داشته است مقادیر تجمعی باران اندازه‌گیری شده با دستگاه ثبات بصورت زیر بوده است.

زمان (h)	0	2	4	6	8	10	12	14
بارش تجمعی (cm)	0	1.0	3.0	5.5	7.7	8.0	9.0	10.0

چنانچه نمایه Φ برابر 0.35 cm/h باشد حجم رواناب حاصله از این بارش چقدر است:

حل

با توجه به مقدار بارش در بازه زمانی t = 2h و نمایه Φ جدول زیر را تشکیل می‌دهیم

بازه زمانی (2h)	بارش تجمعی (cm)	بارش دوبازه زمانی (cm)	تلفات نفوذ (Φ × t) cm	بارش اضافی (cm)	شدت بارش (cm/h)
0-0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1
0-2	1.0	1.0	0.7	0.3	0.15
2-4	3.0	2.0	0.7	1.3	0.65
4.6	5.5	2.5	0.7	1.8	0.90
6-8	7.7	2.2	0.7	1.5	0.75
8-10	8.0	0.3	0.7	0.0	0.00
10-12	9.0	1.0	0.7	0.3	0.15
12-14	10.0	1.0	0.7	0.3	0.15

بر اساس این جدول حجم رواناب برابر خواهد بود با

حجم رواناب = 2(0 + 0.15 + 0.65 + 0.9 + 0.75 + 0.0 + 0.15 + 0.15) (مساحت حوضه)

حجم رواناب = (5.5 cm) (مساحت حوضه)

حجم رواناب = (0.055 m) (25×10^6)

حجم رواناب = 1.375×10^6 m^3

یکی از روش‌های ساده برای محاسبه Φ_{index} بصورت زیر می‌باشد

$$\Phi_{index} = I - R \qquad (۹-۸)$$

$$R = \alpha I^{1.2} \qquad (۱۰-۸)$$

در این فرمول‌ها:

I = متوسط شدت بارندگی در طول بارش (mm/h)

R = رواناب (mm).

برای محاسبه R از معادله ۸-۹ باید I را بر حسب میلی‌متر در روز (mm/day) گرفت. اما برای محاسبه Φ_{index} از معادله ۸-۸ باید R را بر ۲۴ تقسیم کرد تا به mm/h تبدیل شود. در معادله ۸-۸ مقدار I نیز بر حسب میلی‌متر در ساعت است.

α = ضریبی است که بستگی به نوع خاک داشته و مقدار آن در حوضه‌های آبریز بین ۰/۱۷ تا ۰/۵ می‌باشد. اما برای خاکهای مختلف عبارت است از:

برای خاکهای شنی = 0.20

برای خاکهای آبرفتی = 0.25

برای خاکهای سیلتی = 0.35

برای خاکهای رسی = 0.40

اراضی شیبدار تپه‌ای = 0.50

● مثال ۸-۱۴

برای بارانی که در مثال ۸-۱۰ ارائه شده است نمایه Φ را بر اساس معادلات ۸-۹ و ۸-۱۰ محاسبه کنید فرض کنید مقدار α برای خاکهای حوضه ۰/۲ می‌باشد.

$$\alpha = 0.2$$

$$I = \frac{4 + 5 + 3 + 7.33 + 0.67}{5}$$

$$I = 4 \text{ mm/h}$$

$$I = (4)\ (24) = 96 \text{ mm/day}$$

$$R = \alpha I^{1.2}$$

$$R = 0.2\ (96)^{1.2} = 47.8$$

$$\Phi = I - R$$

$$\Phi = 4 - \frac{47.8}{24} = 4 - 1.9 = 2.1 \text{ mm/h}$$

برای استفاده از روش فوق باید اطلاعات کافی از نوع خاکهای حوضه و شیب اراضی داشت که در مطالعات اولیه هیدرولوژی در اختیار نمی‌باشد لذا فقط بعنوان تخمین نمایه Φ می‌توان از آن استفاده کرد.

با توجه به مشکلات و فرضیاتی که در تخمین نمایه Φ وجود دارد در مطالعات هیدرولوژی توصیه نمی‌شود وقت زیادی را صرف برآورد آن نمود بلک کافی است از طریق آزمون و خطا به رقم معقولی که مورد قبول طراح باشد دست پیدا کرد. مثال زیر نمونه ای از این نوع آزمون و خطاها می‌باشد.

● مثال ۸-۱۵

در طی یک بارندگی ۶ ساعته شدت بارش به شرح زیر بود است.

زمان(h)	0	1	2	3	4	5	6
شدت(cm/h)		0.5	1.5	1.2	0.3	1	0.5

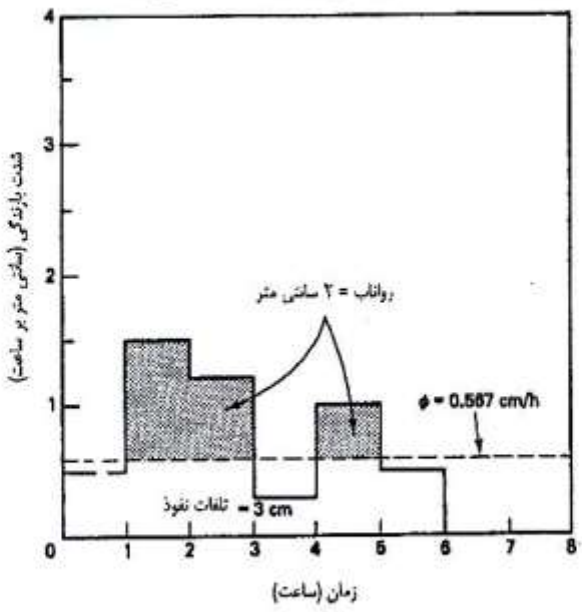
مقدار رواناب ناشی از این بارندگی در حوضه ۲ سانتی‌متر تخمین زده می‌شود نمایه Φ چقدر است؟

حل

چنانچه هیستوگرام بارندگی را رسم کنیم مشاهده می شود که ارتفاع کل بارندگی ۵ سانتی‌متر و رواناب ۲ سانتی‌متر است لذا تلفات ناشی از نفوذ ۳ سانتی‌متر می‌باشد. با آزمون و خطا مقدار نمایه Φ قابل محاسبه است. اگر فرض کنیم نمایه Φ بین ۰/۵ تا ۱ سانتی‌متر در ساعت است معادله توازن بارش عبارت خواهد بود از:

$$(1.5 - \Phi) \times 1 + (1.2 - \Phi) \times 1 + (1.0 - \Phi) \times = 2 \text{ cm}$$

از این معادله $\Phi = 0.567$ cm/h بدست می‌آید. حال می‌توان بررسی کرد که آیا $\Phi = 0.567$ نمایه صحیحی است یا خیر در غیر این صورت عدد آبگیری را بر Φ در نظر می‌گیریم تا سرانجام مقدار رواناب که در شکل بالای خط Φ قرار می‌گیرد برابر ۲ سانتی‌متر باشد.



۸-۳-۲ نمایه W (W-Index)

نمایه-W که در واقع حالت اصلاح شدهٔ نمایه -Φ می‌باشد عبارت است از متوسط سرعت نفوذ در دوره‌ای که شدت بارندگی از ظرفیت نفوذ بیشتر باشد و تلفات اولیه بارندگی و نگهداشت سطحی نیز از آن کمتر شده باشد. یعنی:

$$W-Index = \frac{F}{T_R} = \frac{1}{T_R}(P - Q - S) \qquad (۸-۱۱)$$

در این فرمول F مقدار کل نفوذ، T_R مدتی که در آن شدت بارندگی بیش از نمایه W باشد، P مقدار بارندگی ، Q رواناب سطحی و S نگهداشت یا ذخیرهٔ سطحی است. بطوریکه ملاحظه می‌شود نمایه W همان نمایه -Φ است منهای نگهداشت ذخیرهٔ سطحی . به دلیل آنکه اندازه‌گیری یا تخمین نگهداشت سطحی بسیار مشکل است، لذا معمولاً نمایه -W کمتر مورد استفاده قرار می‌گیرد. اگر از مقدار ذخیره سطحی صرفنظر شود (S = 0) و نیز فرض شود که T_R برابر زمان کل بارندگی (t) است ($T_R = t$) در این صورت:

$$W-Index = \frac{P - Q}{t} \qquad (۸-۱۲)$$

که P مقدار کل بارندگی در طول بارش (mm) ، Q رواناب (mm) و t مدت بارندگی (hr) است. مدتی پس از شروع بارندگی که خاک به حالت اشباع درآمد و گودالهای کوچک سطح زمین از آب پر گردید، نمایه W به حداقل خود می‌رسد و مقدار آن مساوی نمایه Φ می‌شود. این وضعیت حالتی است که در محاسبه حداکثر دبی سیلابها مورد استفاده قرار می‌گیرد. با داشتن نمایه -W و مقدار بارندگی می‌توان ضریب جریان سطحی (رواناب) را از فرمول زیر محاسبه نمود.

$$K = \frac{P - (W\text{-index})}{P} \qquad (۸-۱۳)$$

که P مقدار کل بارندگی و K ضریب رواناب است.

● **مثال ۸-۱۶**

شدت بارندگی در دوره‌های ۲۰ دقیقه‌ای برای بارانی که جمعاً ۱۴۰ دقیقه به طول انجامیده است ۲۵، ۲۵، ۱۰۰، ۷۵، ۱۲/۵ ، ۱۲/۵ و ۵۰ میلی‌متر در ساعت بوده است. چنانچه نمایه Φ برابر ۳۲ میلی‌متر در ساعت فرض شود. حساب کنید مقدار رواناب (برحسب میلی‌متر)، مقدار کل بارندگی و نمایه W را.

حل

بر اساس نمایه Φ مقدار رواناب برابر است با:

$$\text{رواناب} = (100 - 32)\frac{20}{60} + (75 - 32)\frac{20}{60} + (50 - 32)\frac{20}{60}$$

$$\text{رواناب مستقیم} = 43 \text{ mm}$$

$$\text{کل بارندگی} = (25 + 25 + 100 + 75 + 12.5 + 12.5 + 50)\frac{20}{60}$$

$$\text{کل بارندگی} = 100 \text{ mm}$$

با فرض این که $S = 0$ و زمانی که بارندگی بیشتر از مقدار نفوذ می‌باشد برابر کل مدت بارش است خواهیم داشت:

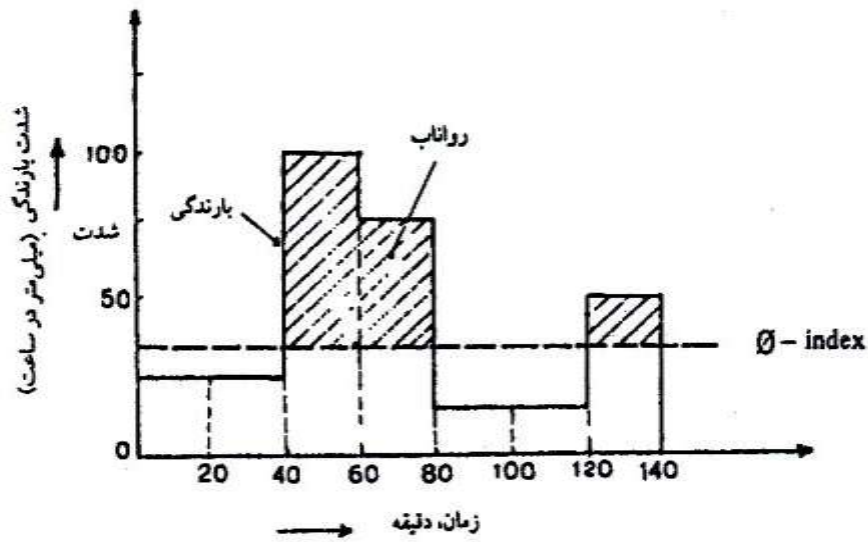
$$\text{W-index} = \frac{P - Q - S}{t}$$

$$\text{W-index} = \frac{100 - 43}{140/60}$$

$$\text{W-index} = 24.4 \text{ mm/hr}$$

در صورتی که زمان بارش اضافی را فقط ۳ دوره ۲۰ دقیقه‌ای در نظر بگیریم نمایه W برابر خواهد بود با ۵۷ میلی‌متر بر ساعت که درست بنظر نمی‌رسد.

$$\text{W-index} = \frac{100 - 43}{60/60} = 37 \text{ mm/h}$$



شکل ۸-۱۴

مشاهده می‌شود که برای استفاده از نمایه W- باید دقیقاً دانست که نگهداشت سطحی

(چالاب) در حوضه چقدر است و در کدام زمان‌ها مقدار بارش بیشتر از نفوذ می‌باشد که عملاً چنین اطلاعاتی از حوضه وجود ندارد. لذا استفاده از این نمایه توصیه نمی‌شود.

۸-۳-۳ نمایه حداقل

در پاره‌ای موارد برای محاسبه حداکثر سیل از نمایه دیگری بنام *نمایه حداقل* (Φ_{min}) نیز استفاده می‌شود و آن برابر است با مقدار حداقل سرعت نفوذ آب در خاک که در واقع همان ظرفیت نفوذ نهایی آب در خاک می‌باشد. تخمین حداقل سرعت نفوذ بر اساس آزمایشات صحرائی بوده و یا آنکه همان نفوذ نهایی خاک را برابر نمایه حداقل می‌گیرند.

در عمل در محاسبات طراحی سیل به دلیل این که اولاً بارش‌ها زمانی صورت می‌گیرند که فصل بهار یا زمستان بوده و سطح حوضه مرطوب و مقدار نفوذ آب در خاک کم است و ثانیاً ارتفاع بارش و رواناب در مقایسه با مقدار نفوذ بسیار زیاد می‌باشد توصیه نمی‌شود که عملیات پیچیده‌ای را برای محاسبه نمایه‌های نفوذ بکار ببریم و بهتر است که در جهت اطمینان از میزان نفوذ صرف‌نظر کرده و آن را در نظر نگیریم. با این وجود در طرح‌های آبخیزداری که مسأله نفوذ آب در خاک بیش از موضوع سیل مطرح می‌باشد لازم است تا حد امکان میزان نفوذ آب در حوضه را با دقت اندازه‌گیری یا تخمین بزنیم. هم‌چنین در محاسبات آبدهی حوضه‌ها نیز باید به تلفات نفوذ و برگاب توجه شود در غیر اینصورت ممکن است با ارقامی از آبدهی حوضه‌ها مواجه شویم که عملاً دور از انتظار است.

مسائل

۸-۱ مقدار بارندگی در طی ۶ ساعت بارش به ترتیب ۷، ۱۸، ۲۵، ۱۲، ۱۰ و ۳ میلی‌متر در هر ساعت بوده است. رواناب سطحی در اثر این بارندگی جمعاً ۳۳ میلی‌متر اندازه‌گیری شده است. نمایه Φ- را برای این حوضه به دست آورید. اگر توزیع همین بارندگی به صورت ۵، ۱۵، ۲۰، ۱۴ و ۱میلی‌متر در هر ساعت می‌بود نمایه Φ- به ازای ۳۳ میلی‌متر رواناب چه اندازه بود؟

(جواب: ۸ و ۹ میلی‌متر در ساعت).

۸-۲ مقدار بارندگی در دوره‌های ۳۰ دقیقه از شروع یک بارندگی تا انتهای آن که ۱۸۰ دقیقه به طول‌انجامیده است، اندازه‌گیری شده که به شرح زیر بوده است. چنانچه نمایه Φ- معادل ۱۵ میلی‌متر در ساعت فرض شود مقدار رواناب و نمایه W- را محاسبه کنید.

ارتفاع بارندگی (mm)	دورهٔ زمانی (دقیقه)
۱۲	۰-۳۰
۸	۳۰-۶۰
۱۴	۶۰-۹۰
۱۲	۹۰-۱۲۰
۹	۱۲۰-۱۵۰
۵	۱۵۰-۱۸۰
۰	۱۸۰

(جواب: 17.5 mm و 14.2 mm/hr)

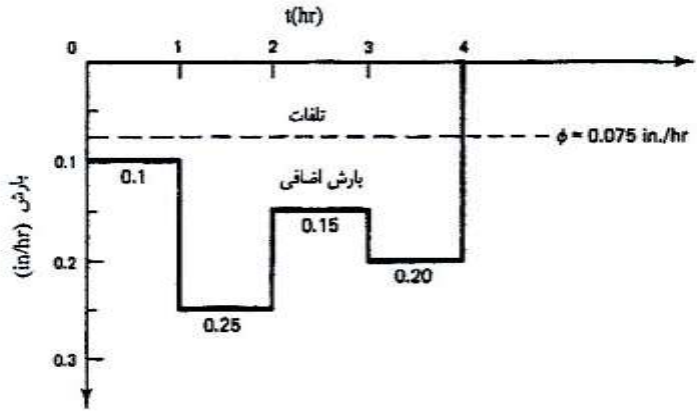
۸-۳ در جدول زیر مقدار بارندگی در یک حوضهٔ آبریز در طی سه نوع بارش نشان داده شده است. ارتفاع رواناب حاصله از این بارشها به ترتیب ۱۴، ۳۳ و ۱۸/۵ میلی‌متر بوده است. نمایه Φ را برای این حوضه محاسبه کنید.

ساعت	بارش (۱) (mm)	بارش (۲) (mm)	بارش (۳) (mm)
۱	۲	۴	۳
۲	۶	۹	۸
۳	۷	۱۵	۱۱
۴	۱۰	۱۲	۴
۵	۵	۵	۱۲
۶	۴		۳
۷	۴		
۸	۲		

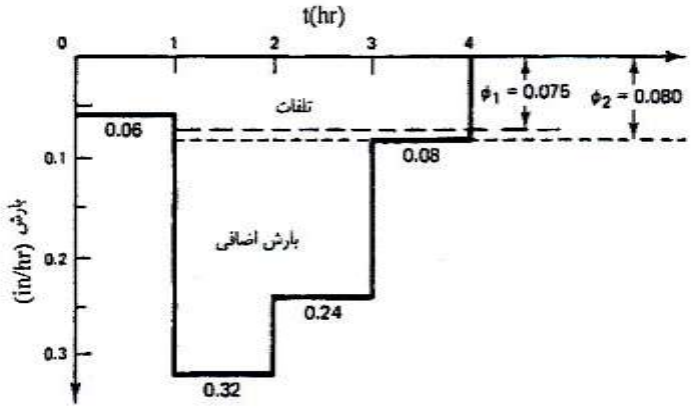
۸-۴ بارانی بمدت ۶ ساعت باریده و مقادیر شدت آن در ساعات مختلف به ترتیب ۰/۵، ۱/۵، ۱/۲، ۰/۳، ۱/۰ و ۰/۵ سانتی‌متر در ساعت بوده است. مقدار رواناب مستقیم ۲ سانتی‌متر تخمین زده می‌شود، حساب کنید نمایه -Φ را
(جواب: ۰/۵۶۷ سانتی‌متر در ساعت).

۸-۵ روی حوضه‌ای به مساحت ۵۰۰ ایکر بارانی بمدت ۱۵۰ دقیقه رخ داده است که شدت آن در دوره‌های ۳۰ دقیقه‌ای به ترتیب ۴/۵، ۳، ۲، ۳/۵، و ۲ اینچ در ساعت بوده‌است. حجم رواناب مسقیم حاصله از این بارندگی ۱۰۵ ایکر-فوت می‌باشد. حساب کنید نمایه Φ را در این حوضه
(جواب: ۱/۹ اینچ بر ساعت)

۸-۶ در شکل زیر هاتیوگراف (هیستوگرام بارش نسبت به زمان) یک بارش ۴ساعته رسم شده است. با توجه به ارقام روی شکل مقدار رواناب مستقیم چقدر می‌باشد
(جواب = ۱۰ میلی‌متر)



۷-۸ در شکل زیر هایتوگراف یک بارش ۴ ساعته رسم شده است. چنانچه مقدار رواناب مستقیم حاصله از این بارش ۲۰ میلی‌متر (۰/۴ اینچ) باشد کدام یک از نمایه‌های Φ که درشکل نشان داده شده است (۰/۰۷۵ و ۰/۰۸۰ اینچ بر ساعت) صادق می‌باشد.
(جواب ۰/۰۸= اینچ بر ساعت)



۸-۸ در یک حوضه آبریز به مساحت ۴۳۰کیلومتر مربع بارانی با مشخصات زیر باریده است چنانچه مقدار رواناب حاصله از این بارش ۱۰/۷۵ میلیون متر مکعب اندازه‌گیری شده باشد نمایه Φ در این حوضه چقدر است؟

زمان بارش (h)	15	18	21	24	03
ارتفاع بارش (cm)	1.2	1.5	0.9	2.2	0.2

(جواب = Φ = 2.75 cm/h)

منابع برای مطالعه بیشتر

1- Childs, E., *An introduction to the physical basis of soil water phenomena,* John Wiley Co.,London, 1969.
2- Foster, E., *Rainfall and Runoff.* MacMillan Co. London,1949.
3- Hillel, D., *Soil and Water,* Academic press, NewYork, 1971.
4- Horton, R., *The role of infiltration in the hydrological cycle.* Trans. AGU.1944.
5- Linsley, R. et al, *Hydrology for engineers,* McGraw Hill Co. New York, 1982.
6- Shaw, E., *Hydrology in practice,* Van Nostrand Reinhold, London, 1983.
7- Ward, A.D. and W.J. Elliot, *Environmental hydrology,* Lewis publ. CRC, New York, 1995.
8- Wilson, E., *Engineering hydrology,* Mac Millan Co. London, 1984.