نفوذ کرده در کل زمان بارش است که برحسب واحد ارتفاع میلیمتر سنجیده می شود. ظرفیت نفوذ عبارتست از حداکثر شدت نفوذی که در یک خاک مشخص در تحت شرایط معین اتفاق می افتد.

۴-۳-۱ عوامل موثر در نفوذ

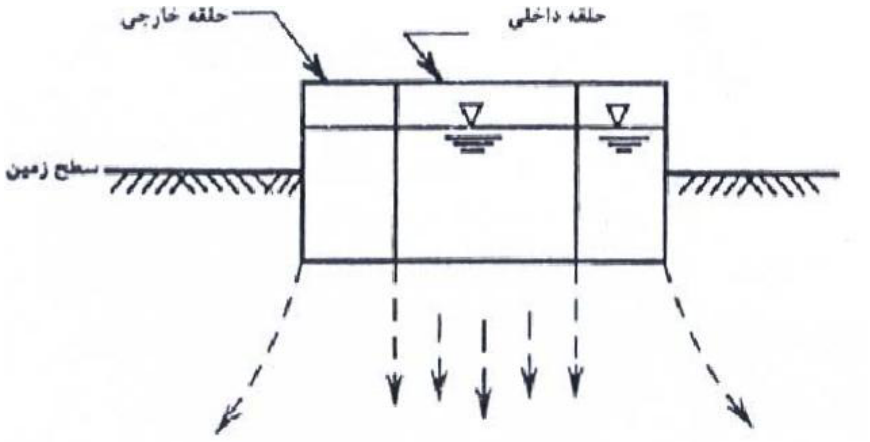
مقدار و شدت نفوذ آب در خاک از سطح زمین بستگی به پارامترهای مختلفی از جمله مشخصات بارش، شرایط خاک سطحی و مشخصات خاک اعم از مشخصات فیزیکی و مکانیکی آن دارد. شدت و مدت بارش در مکانیزم نفوذ موثر است. بارش‌های مداوم و سنگین، باعث کاهش سریع ظرفیت نفوذ خاک شده تا به یک مقدار ثابت نفوذ برسد. در بارش های با شدت کم، میزان کاهش ظرفیت نفوذ کمتر شده و باران با شدت ثابتی در مدت طولانی تری به میزان نسبتاً ثابتی نفوذ می کند.

شرایط خاک سطحی اعم از وجود پوشش گیاهی در آن، نوع کاربری اراضی و شیب سطح زمین در میزان نفوذ موثر است، بطوری که اراضی دارای پوشش گیاهی، ظرفیت نفوذ بیشتری نسبت به اراضی مشابه و بدون پوشش گیاهی دارند. با افزایش شیب زمین، ارتفاع آب روی زمین کاسته شده و باعث نفوذ کمتر آب به داخل خاک می شود.

مشخصات خاک شامل رطوبت اولیه، تخلخل، بافت و ساختمان خاک و هدایت هیدرولیکی در نفوذ اولیه و شدت نفوذ موثرند. تخلخل زیاد خاک باعث افزایش شدت نفوذ شده و خاک های با بافت ریزدانه، ظرفیت نفوذ به مراتب کمتری نسبت به خاک های درشت دانه دارند. هر چه میزان رطوبت اولیه خاک کمتر باشد به همان نسبت شدت نفوذ اولیه بیشتر می شود. شرایطی آب در حال نفوذ نیز در مکانیزم نفوذ موثر است. بطوریکه آب گل آلوده یا لزج تر، شدت نفوذ کمتری نسبت به آب صاف دارد.

۴-۳-۲ اندازه گیری مقدار نفوذ

اندازه‌گیری مقدار نفوذ توسط نفوذسنج‌ها به صورت صحرایی صورت می گیرد. کاربردی ترین نوع نفوذسنج ها، از نفوذسنج با حلقه مضاعف (Double-ring infiltrometer) است. مطابق شکل ۴-۱ این نفوذسنج از دو حلقه درونی و بیرونی تشکیل شده است که قطر حلقه داخلی 30 و بیرونی 60 سانتیمتر و ارتفاع آنها 25 سانتیمتر است.این حلقه ها توسط چکش به داخل زمین کوبیده شده تا حدود ارتفاع 15 سانتیمتر آنها در خاک فرو رود. داخل حلقه درونی و بین حلقه ها را آب می ریزند. سپس در فواصل زمانی 5، 10، 15، 20، 30، 40 و 60 دقیقه تا حدود 6 ساعت مقدار پائین رفتگی سطح آب استوانه داخلی اندازه گیری می شود. آب بین استوانه داخلی و خارجی فقط برای کنترل حرکت عمودی آب در استوانه داخلی است و هیچگونه اندازه گیری روی آن صورت نمی گیرد. با اندازه گیری افت سطح آب نسبت به زمان، رابطه بین شدت نفوذ و زمان حاصل می شود.



شکل ۴-۱ نفوذسنج با حلقه مضاعف

۴-۳-۳ معادلات نفوذ

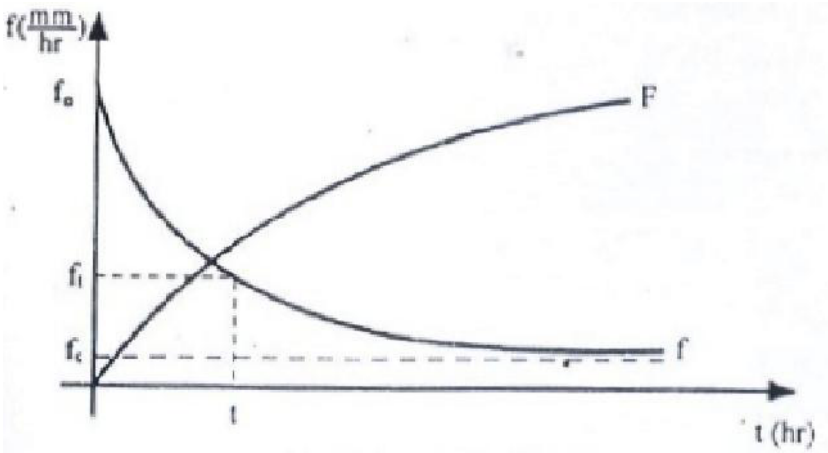
از آنجا که تخمین میزان نفوذ در بررسی فرایندهای هیدرولوژیکی به ویژه تبدیل بارش به جریان، از اهمیت ویژه ای برخوردار است، لذا تاکنون بطور نظری و با در نظر گرتفن عوامل موثر در پدیده نفوذ و شدت آن، معادلات متعددی ارائه گردیده که هر کدام دارای مزیت ها و قابلیت های کاربردی خاص خود است. در این رابطه دو معادله کاربردی برای برآورد مقدار و شدت نفوذ، یعنی معادلات هورتون (Horton) و فیلیپ (Philip) ارائه شده است. در اینجا فقط به معادله هورتون پرداخته می شود.

معادله هورتون

همانگونه که ذکر شد، شدت نهایی نفوذ آب در خاک را ظرفیت نفوذ گفته با f_c نشان می دهند. هرگاه شدت بارش کمتر از ظرفیت نفوذ خاک باشد، شدت نفوذ عملاً برابر با شدت بارش بوده و هیچگونه روانابی بر روی زمین تشکیل نمی شود. در صورتی که شدت بارش بیشتر از ظرفیت نفوذ باشد، آنگاه بخشی از بارش در داخل خاک نفوذ کرده و بخشی دیگر به صورت رواناب بر روی سطح زمین جریان می یابد. بدیهی است ظرفیت نفوذ خاک با افزایش زمان به شدت و تقریباً به صورت نمایی نسبت به زمان نفوذ کاهش می یابد، بطوری که در ابتدای بارش ظرفیت آن حداکثر $(f_\circ)$ می رسد. ساده ترین و کاربردی ترین معادله نفوذ، معادله هورتون است که به فرم زیر بیان می شود:

$$f_t = f_c + (f_\circ - f_c)e^{-kt}$$

که $f_t =$ شدت نفوذ در زمان t از شروع بارش (mm/hr)، $f_c =$ شدت نفوذ نهایی (mm/hr)، $f_\circ =$ شدت نفوذ اولیه (mm/hr)، T= زمان از شروع بارش (hr)، k= ثابت هورتون که بستگی به کاربری اراضی و جنس خاک دارد (hr^{-1}). در شکل ۴-۲ فرم کلی منحنی هورتون نشان داده شده است.



شکل ۴-۲ فرم کلی منحنی نفوذ هورتون

مقدار نفوذ تجمعی از برآورد سطح زیر منحنی شدت نفوذ به دست آمده و یا با انتگرال گیری از رابطه نفوذ محاسبه می شود:

$$F = \int_{\circ}^{t} f_t dt$$

که F= نفوذ تجمعی (mm)، f_t = شدت نفوذ در زمان t (mm/hr).

مقدار شدت نفوذ نهایی عمدتاً بستگی به جنس خاک و پوشش گیاهی منطقه دارد. پوشش گیاهی خود باعث افزایش مقدار شدت نفوذ نهایی به دلیل متخلخل کردن بیشتر خاک توسط ریشه های آن می شود. در جدول ۴-۲ مقادیر f_c برای انواع خاک ها و در جدول ۴-۳ ضریب تعدیل جهت اعمال پوشش گیاهی در منطقه ارائه گردیده است.

جدول ۴-۲ سرعت نفوذ نهایی آب در خاک (f_c)

نوع خاک	$f_c\,(mm/hr)$
شن غیر متراکم	۱۳-۲۵
لوم	۲/۵-۷/۶
رس متراکم	۰/۲۵-۲/۵

جدول ۴-۳ ضرایب تعدیل سرعت نفوذ نهایی براساس نوع پوشش گیاهی

نوع پوشش	تراکم پوشش گیاهی	ضریب تعدیل
جنگل ها و مراتع دائمی	زیاد	۷/۵ تا ۳
	متوسط	۳ تا ۲
	کم	۱/۴ تا ۱/۲
گیاهان ردیفی	زیاد	۱/۵ تا ۱/۳
	متوسط	۱/۱ تا ۱/۳
	کم	۱/۱ تا ۱/۰
گیاهان غیر ردیفی	زیاد	۳/۰ تا ۲/۵
	متوسط	۲/۰ تا ۱/۶
	کم	۱/۳ تا ۱/۱

سرعت نفوذ اولیه آب در خاک باید با توجه به نوع خاک و پوشش گیاهی تخمین زده شود. البته در صورت نیاز به دقت بالا، لازم است این مقدار در محل اندازه گیری شود. در جدول ۴-۴ مقادیر تجربی سرعت اولیه نفوذ آب در خاک $(f_\circ)$ آمده است.

جدول ۴-۴ سرعت نفوذ اولیه آب در خاک $(f_\circ)$

نوع خاک و پوشش گیاهی	$f_\circ\,(mm/h)$
خاک های فاقد پوشش گیاهی	۱۶/۲
اراضی جنگلی و علفزارها	۱۱۷
خاک های رسی بدون پوشش گیاهی	۳۶
خاک های شنی دارای پوشش گیاهی متراکم	۱۰۸

از عوامل دیگر معادله هورتون، ثابت آن (k) است که با انجام آزمایش در محل تعیین می شود. در صورت نیاز به یک تخمین اولیه از مقادیر پارامترهای معادله هورتون می توان از مقادیر مندرج در جدول ۴-۵ نیز استفاده نمود.

جدول ۴-۵ مقادیر تجربی پارامترهای معادله هورتون

نوع خاک و پوشش گیاهی	$f_\circ\,(mm/h)$	$f_c\,(mm/h)$	$k(\min^{-1})$
خاک کشاورزی بدون پوشش گیاهی	۳۸۰	۲۲۰ تا ۶	۱/۶
خاک کشاورزی پوشیده از چمن	۹۰۰	۲۹۰ تا ۲۰	۰/۸
خاک های آلی (Peat)	۳۲۵	۲۹ تا ۲	۱/۸
خاک های رسی حاوی شن ریز بدون پوشش گیاهی	۲۱۰	۲۵ تا ۲	۱/۰
خاک های رسی حاوی شن ریز دارای پوشش چمن	۶۷۰	۳۰ تا ۱۰	۱/۴

مثال ۴-۱ در منطقه ای شدت بارش و شدت نفوذ در طول 30 دقیقه مطابق جدول ۴-۶ اندازه گیری شده است. مطلوب است برآورد اجزا، معادله هورتون و ارتفاع معادل آبی که به رواناب تبدیل شده است. از تبخیر و تعرق و چالاب صرفنظر شود.

جدول ۴-۶ شدت بارش و نفوذ در طی ۳۰ دقیقه

$t(\min)$	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۸	۱۰	۱۲
$I(cm/hr)$	۵	۵	۵	۵	۵	۷/۵	۷/۵	۷/۵	۷/۵
$f(cm/hr)$	۳/۹	۳/۴	۳/۱	۲/۷	۲/۵	۲/۳	۲/۰	۱/۸	۱/۵۴
$t(\min)$	۱۴	۱۶	۱۸	۲۰	۲۲	۲۴	۲۶	۲۸	۳۰
$I(cm/hr)$	۷/۵	۲/۵	۲/۵	۲/۵	۲/۵	۲/۵	۲/۵	۲/۵	۲/۵
$f(cm/hr)$	۱/۴۳	۱/۳۶	۱/۳۱	۱/۲۸	۱/۲۵	۱/۲۳	۱/۲۲	۱/۲۰	۱/۲۰

حل: برای محاسبه ثابت هورتون، k، با لگاریتم گیری از طرفین معادله معادله هورتون داریم:

$$\log(f_t - f_c) = \log(f_o - f_c) - kt\log e \quad , \quad t = \frac{\log(f_o - f_c)}{k\log e} - \frac{\log(f_t - f_c)}{k\log e}$$

که معادله یک خط در کاغذ نیمه لگاریتمی به صورت $y = ax + b$ است که در آن $y = t$، $x = \log(f_t - f_c)$، $a = \frac{-1}{k\log e}$ و $b = \frac{\log(f_\circ - f_c)}{k\log e}$ شود. بنابراین با رسم مقادیر $(f_t - f_c)$ روی محور لگاریتمی در مقابل زمان t بر روی محور غیر لگاریتمی، مقدار ضریب هورتون مشخص می شود. مقدار نفوذ نهایی $f_c = 1.2(\mathrm{cm/hr})$ می باشد و بر این اساس مقادیر $(f_t - f_c)$ مطابق شکل ۴-۳ براساس زمان رسم گردیده است. از این نمودار ضریب زاویه برابر است با:

$$a = -0.1933 = -\frac{1}{k\ \log e}, \quad \log e = 0.434, \quad k = \frac{1}{0.1933 \times 0.434} = 11.92\left(hr^{-1}\right)$$

از طرفی در t=0 داریم: $f_t - f_c = 3.3 = f_\circ - f_c \quad , \quad f_\circ = 3.3 + 1.2 = 4.5(cm/hr)$

و لذا فرم معادله هورتون در این منطقه به صورت زیر به دست می آید:

$$f_t = 1.2 + (4.5 - 1.2)e^{-11.92t}, \qquad f_t = 1.2 + 3.3e^{-11.92t}$$

برای محاسبه مجموع آب نفوذ کرده داریم:

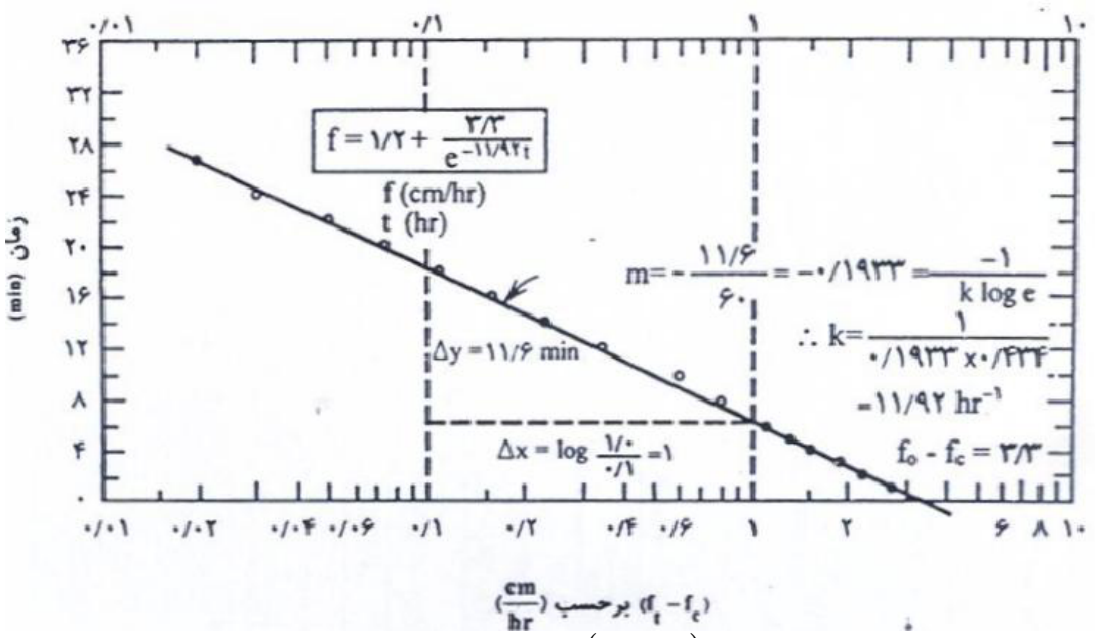
$$F = \int_\circ^t f_t dt = \int_\circ^{\frac{3}{60}} \left(1.2 + 3.3e^{-11.92t}\right)dt = \left[1.2t + \frac{3.3}{-11.92}e^{-11.92t}\right]_\circ^{0.5} = 0.876\ (cm)$$

مجموع ارتفاع آب باریده برابر است با: $P = 5\times\frac{5}{60} + 7.5\times\frac{10}{60} + 2.5\times\frac{15}{60} = 2.29cm$

لذا ارتفاع معادل رواناب برابر است با: $R = P - F = 2.29 - 0.876 = 1.414(cm)$

مثال ۴-۲: در منطقه ای به مساحت 1.8 کیلومترمربع بارشی به ارتفاع 10 سانتیمتر در طول مدت 24 ساعت رخ داده است. بخشی از این بارش در خاک نفوذ کرده، که ظرفیت نفوذ اولیه آن $1(cm/hr)$ و ظرفیت نهایی آن $0.3(cm/hr)$ پس از 15 ساعت از شروع بارش است. ثابت هورتون $k = 5\left(hr^{-1}\right)$ می باشد. در این منطقه مقدار تبخیر از تشتک در طول این روز پس

از کسر مقدار بارش 9.6 سانتیمتر می باشد.اگر ضریب تشتک 0.7 و از بقیه تلفات صرفنظر شود، حجم رواناب تولیدی در این منطقه چند مترمکعب بوده است؟



شکل ۴-۳ تغییرات $(f_t - f_c)$ برحسب t بر روی کاغذ نیمه لگاریتمی

حل: مجموع ارتفاع آب نفوذ کرده برابر است با:

$$F = \int_{\circ}^{24} f_t dt = \int_{\circ}^{24} \left[0.3 + (1.0 - 0.3)e^{-5t}\right] dt = \left[0.3t - \frac{0.7}{5}e^{-5t}\right]_{\circ}^{24} = 7.34\,(cm)$$

از طرفی ارتفاع معادل تبخیر برابر است با: $E_O = kE_{pan} = 0.7 \times 0.6 = 0.42(cm)$

لذا ارتفاع رواناب برابر با: $R = 10 - 7.34 - 0.42 = 2.24(cm)$

و از این رو حجم رواناب برابر است با: $V_R = R \times A = \frac{2.24}{100} \times 1.8 \times 10^6 = 40,320(m^3)$

۴-۳-۴ اندیس های نفوذ/تلفات

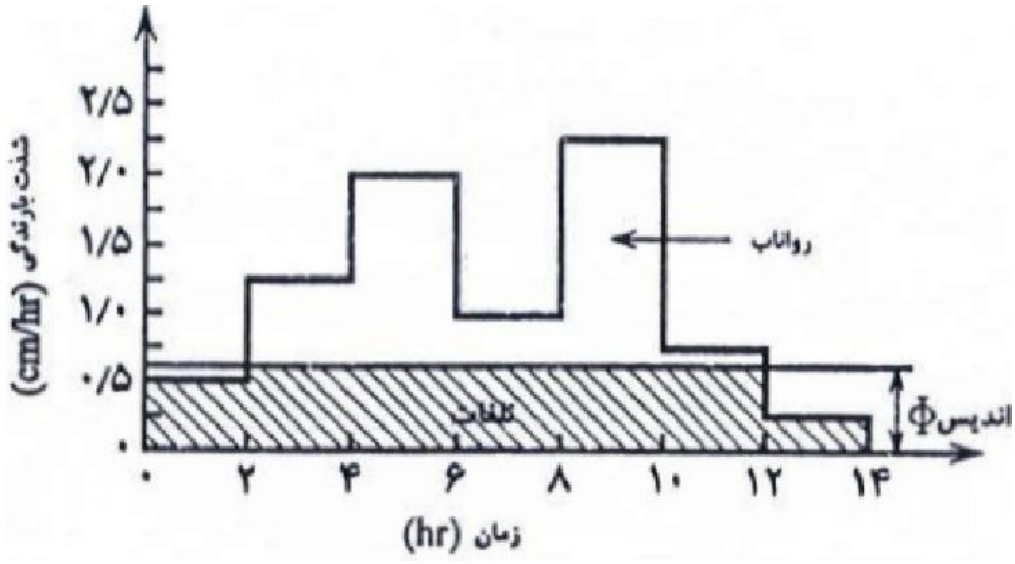
در طراحی های هیدرولوژیکی جهت سادگی محاسبات سعی می شود به جای استفاده از معادلات نفوذ که با زمان تغییر می کند، از یک نفوذ ثابت در طول بارش استفاده شود. در واقع شاخص های نفوذ[1] عبارتست از مقدار میانگین نفوذ در طول یک بارش. شدت بارش می‌تواند نیز در طول مدت بارش متغیر باشد. بدیهی است در این حالت، مقدار نفوذ واقعی در ابتدای بارش از میزان برآورد شده با اندیس نفوذ بیشتر و در انتها بارش کمتر باشد. با فرض اینکه مقادیر این اندیس ها نفوذی باشد که به رواناب تبدیل نشود (این فرض در مواردی می تواند درست باشد)، یعنی تلفات محسوب شود، مقدار مازاد بر آن را می توان

[1] - Infiltration indices

برابر رواناب دانست که به رواناب مستقیم معروف است. بدین ترتیب، در صورتیکه مقدار شدت بارش بیشتر از این اندیس ها باشد، رواناب ایجاد می شود. لذا به سادگی با استفاده از هیتوگراف بارش و مقدار اندیس نفوذ (هیدروگراف اندیس!) می توان حجم رواناب را به دست آورد. دو اندیس معمول قابل کاربرد در هیدرولوژی عبارتند از اندیس های Φ و W که تفاوت آنها در میزان برگاب و چالاب است.

اندیس Φ

اندیس Φ عبارتست از میانگین شدت بارشی که بالاتر از آن بطور کامل به رواناب تبدیل شده و برابر با حجم رواناب خروجی از منطقه است. در شکل ۴-۴ مفهوم اندیس Φ نمایش داده شده است. براساس تعریف اندیس Φ ، کلیه تلفات بارش مشتمل بر نفوذ، برگاب و چالاب در تعیین این اندیس موثرند. از آنجا که مقدار تبخیر و تعرق در طول مدت بارش ناچیز می باشد، لذا مقدار آن عموماً به عنوان تلفات بارش در طول مدت بارش مطرح نمی شود. برای محاسبه مقدار اندیس Φ با استفاده از حجم رواناب خروجی از منطقه و نیز هیتوگراف بارش که حجم بارش را بدست می دهد، مقدار حجم تلفات با کسر حجم بارش از حجم رواناب حاصل می شود. اندیس Φ برابر با اختلاف این دو حجم تقسیم بر طول مدت بارش مازاد می باشد. منطور از طول مدت بارش مازاد[1]، مدت زمانی است که شدت بارش بیشتر از شدت میانگین تلفات یا اندیس Φ ، باشد، لذا تعیین مقدار اندیس Φ به صورت حدس و خط از حدس اولیه آن صورت می گیرد.



شکل ۴-۴ شمایی از اندیس Φ بر روی هیتوگراف بارش

[1] - Time of rainfall excess

مثال ۴-۳: بارش با ارتفاع 10 سانتیمتر در طول 8 ساعت با شدت های مطابق جدول ۴-۸ رخ داده و روانابی به ارتفاع معادل 5.8 سانتیمتر ایجاد نموده است. مقدار اندیس Φ چقدر است؟

جدول ۴-۸ شدت بارش در طول بارش ۸ ساعته

زمان (hr)	۰-۱	۱-۲	۲-۳	۳-۴	۴-۵	۵-۶	۶-۷	۷-۸
شدت بارش (cm/hr)	۰/۴	۰/۹	۱/۵	۲/۳	۱/۸	۱/۶	۱/۰	۰/۵

حل: مقدار ارتفاع معادل تلفات برابر است با:

$$10-5.8=4.2(cm)$$

از آنجا که مدت بارش 8 ساعت بوده است، لذا حدس اولیه برای مقدار اندیس Φ عبارتست از:

$$\Phi=\frac{4.2}{8}=0.525\left(\frac{cm}{hr}\right)$$

براساس این مقدار اولیه $\phi=0.525\ (cm/hr)$ شدت بارش های ساعت اول و هشتم کمتر از شاخص نفوذ است و لذا طول مدت بارش مازاد به 6 ساعت کاهش می یابد. در طول این مدت ارتفاع معادل تلفات برابر است با:

$$10-0.4-0.5-5.8=3.3(cm)$$

و لذا مقدار ثانویه برای Φ برابر است با:

$$\phi=\frac{3.3}{6.0}=0.55(cm/hr)$$

از آنجا که این مقدار اندیس Φ از کلیه مقادیر شدت بارش در طول مدت 6 ساعته بارش مازاد کمتر است، لذا به عنوان مقدار نهایی اندیس Φ قابل قبول است و براساس Φ =0.55 $\left(\frac{cm}{hr}\right)$، ارتفاع معادل رواناب در طول مدت بارش، مطابق جدول ۴-۹ به دست می آید، که مجموع ارتفاع رواناب نیز 5.8 سانتیمتر می باشد.

جدول ۴-۹ ارتفاع رواناب در طول مدت بارش براساس $\phi=0.55\ (cm/hr)$

زمان (hr)	۰-۱	۱-۲	۲-۳	۳-۴	۴-۵	۵-۶	۶-۷	۷-۸
ارتفاع رواناب (cm)	۰	۰/۳۵	۰/۹۵	۱/۷۵	۱/۳۵	۱/۰۵	۱/۴۵	۰

اندیس W

از آنجا که در تعریف اندیس Φ کلیه تلفات بارش اعم از نفوذ، برگاب و چالاب دخالت داده شده، اندیس دیگری به نام اندیس W تعریف گردیده که در آن منظور از تلفات فقط نفوذ است و لذا به غیر از میزان رواناب، مقادیر چالاب و برگاب نیز از مقدار

بارش کسر می شود. لذا می‌توان اندیس W را بدین صورت تعریف نموده که عبارتست از میانگین شدت نفوذ در مدت زمان بارش که در طول این مدت شدت بارش بیشتر از ظرفیت نفوذ باشد، با:

$$W = \frac{P - R - I_\ell}{t_e}$$

که: P= ارتفاع کل بارش (cm)

R= ارتفاع معادل رواناب (cm)

I_ℓ = تلفات اولیه شامل برگاب و چالاب (cm)

t_e = زمان بارش مازاد که در آن شدت بارش بزرگتر از W است (hr)

W= میانگین شدت نفوذ یا اندیس W $\left(\frac{cm}{hr}\right)$

در شرایطی که خاک کاملاً مرطوب باشد و یا ظرفیت نفوذ آب در خاک به حداقل خود رسیده، اندیس W به حداقل خود می رسد. لازم به ذکر است که در طول یک بارش همواره مقدار اندیس Φ بزرگتر از اندیس W است و در حالتی که خاک قبل از بارش شرایط مرطوب داشته و یا تلفات اولیه شامل برگاب و چالاب ناچیز باشد، مقدار این دو اندیس با یکدیگر برابر است.

مثال ۴-۴: در طی یک بارش 140 دقیقه ای، شدت بارش در فواصل 20 دقیقه ای به ترتیب 3، 3، 9، 6.6، 1.2، 1.2 و 6 سانتیمتر در ساعت اندازه گیری شده است. با فرض اینکه $\Phi = 3(\mathrm{cm/hr})$ و تلفات اولیه معادل 3 سانتیمتر باشد، مقدار ارتفاع معادل رواناب و اندیس W را محاسبه کنید.

حل: ارتفاع رواناب برابر است با: $R = \left[(9-3)+(6.6-3)+(6-3)\right]\times\frac{20}{60} = 4.2(cm)$. از آنجا که کل ارتفاع بارش در کل مدت 140 دقیقه معادل P =10 (cm) است، لذا اندیس W برابر است با:

$$W = \frac{P - R - I_\ell}{t_e} = \frac{10 - 4.2 - 3.0}{2.3} = 1.22\,(cm/hr)$$

از آنجا که شدت بارش در بیست دقیقه های پنجم و ششم کمتر از $W = 1.22\,(cm/hr)$ است، لذا مقدار اصلاحی برای اندیس W براساس زمان موثر t_e =100 (min) می باشد و لذا: