فشار منفذی و حالات بحرانی در سدهای خاکی

به‌طور کلی، در بررسی پایداری سدهای خاکی، نیروهایی‌که موجب عدم پایداری شیب‌ها می‌گردند، عبارتند از: نیروی ثقل و نشت. معمولاً نیروی ثقل بجز در مواقع بروز زلزله که به‌علت اثر مؤلفهٔ دینامیکی دچار تغییرات لحظه‌ای گردیده و در نتیجه نیروی جدیدی به نیروهای استاتیکی اضافه می‌شود، ثابت است. در شرایط استاتیکی، حالات بحرانی بر اثر اعمال نیروی نشت و فشار آب منفذی ناشی از آن در مقطع حاصل می‌شود. از آنجاکه مقاومت برشی خاک با افزایش فشار منفذی کاهش می‌یابد، ازاین‌رو برآورد فشار منفذی در حالات مختلف در بررسی پایداری سدهای خاکی اهمیت خاصی دارد.

پایداری شیب‌ها و پی یک سد خاکی را باید در یکی از شرایط بحرانی زیر مورد بررسی قرار داد [۱] :

الف) در حین یا بلافاصله پس از مرحلهٔ ساخت [۲]

ب) در شرایط برقراری نشت پایدار [۳]

ج) در شرایط افت ناگهانی سطح آب [۴]

البته پایداری را به بهترین نحو می‌توان در تمام حالات فوق با استفاده از تحلیل بر مبنای تنش مؤثر ارزیابی کرد. این امر مستلزم شرایط زیر است:

- اندازه گیری پارامترهای مقاومتی زهکشی‌شده (c' و ϕ') در آزمایشگاه
- برآورد مقادیر فشار آب منفذی در شرایط صحرایی برای هریک از سه حالت فوق

۱۱-۲- فشار آب منفذی ناشی از ساخت [۱]

عوامل اصلی کنترل‌کنندهٔ فشار منفذی در حین ساخت عبارتند از [۲]:

الف) نوع خاک

ب) رطوبت خاکریزی و مقدار تراکم که تعیین‌کنندهٔ پارامترهای فشار منفذی می‌باشند

ج) حالت تنش در منطقهٔ مورد بررسی (شامل آثار تراکم اولیه)

د) سرعت پخش فشار منفذی در حین ساخت (که تابع سرعت عملیات خاکریزی و نفوذپذیری مصالح است).

۱۱-۲-۱- پیش بینی فشار منفذی ناشی از ساخت

مقدار فشار آب منفذی ایجادشده در شرایط بدون زهکشی را می‌توان مطابق مطالبی که در فصل نهم تشریح شد، از رابطهٔ زیر تعیین کرد [۲ و ۳]:

$$u = u_o + B\,[\Delta\sigma_3 + A(\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3)] \qquad (۱-۱۱)$$

که در آن :

u = فشار آب منفذی

u_o = فشار آب منفذی اولیه

A و B = پارامترهای فشار منفذی اسکمپتون [۱]

$\Delta\sigma_3$ و $\Delta\sigma_1$ = تغییر در تنش‌های اصلی کل نسبت به شرایط اولیه

بنابراین برای پیش‌بینی فشار منفذی در حین ساخت لازم است اقدامات زیر انجام شود:

الف) فشار منفذی اولیه در آزمایشگاه روی مصالحی‌که مطابق شرایط صحرایی متراکم شده‌اند، اندازه‌گیری شود.

ب) مقدار تغییر تنش که در هر مرحله از عملیات ساخت (خاکریزی) رخ می‌دهد، تعیین شود.

ج) با انجام آزمایش‌های آزمایشگاهی و بارگذاری مشابه با شرایط تغییر تنش در صحرا، مقادیر پارامترهای فشار آب منفذی A و B تعیین شود.

د) فشار منفذی با استفاده از معادلهٔ ۱۱-۱ محاسبه شود.

معادلهٔ ۱۱-۱ را می‌توان به‌صورت زیر تبدیل کرد:

$$u = u_o + \overline{B}\ \Delta\sigma_1 \qquad (۱۱-۲)$$

به‌طوری‌که طبق رابطهٔ مذکور، تغییرات فشار منفذی به‌طور مستقیم به تغییرات تنش اصلی حداکثر مرتبط می‌شود. با مقایسهٔ دو رابطهٔ ۱۱-۱ و ۱۱-۲ مشاهده می‌شود که رابطهٔ زیر برقرار است:

$$\overline{B} = B\,[\frac{\Delta\sigma_3}{\Delta\sigma_1} + A(1 - \frac{\Delta\sigma_3}{\Delta\sigma_1})\,] \qquad (۱۱-۳)$$

بنابراین $\overline{B}$ تابع پارامترهای A و B در نسبت $\frac{\Delta\sigma_3}{\Delta\sigma_1}$ است.

در واقع، در ابتدا σ_1 به‌واسطهٔ تنش‌های محبوس در خاک که در نتیجهٔ تراکم حاصل شده، در جهت افقی عمل می‌کند. با ادامهٔ عملیات خاکریزی و افزایش ارتفاع سد، مرحله‌ای می‌رسد که در آن شرایط هیدرواستاتیک برقرار است. پس از این مرحله، متناسب با تغییر شکل بدنهٔ سد، مقدار σ_1 کم و بیش در جهت قائم عمل خواهد کرد و مقدار آن نزدیک به γh (فشار سربار) می‌گردد، اما بر اثر پدیدهٔ طاق‌زدگی در داخل خاکریزی، ممکن است مقدار آن بیشتر یا کمتر از فشار سربار باشد.

یکی از راه‌های دخالت دادن فشار منفذی در تحلیل پایداری، استفاده از پارامتری به‌نام نسبت فشار منفذی است [1] که با r_u نشان داده شده و برابر است با :

$$r_u = \frac{u}{\gamma h} \qquad (۴-۱۱)$$

در رابطهٔ فوق، γ وزن واحد حجم مصالح بدنهٔ سد و h ضخامت خاکریزی در بالای نقطه‌ای است که در آن u اندازه گیری می‌شود. چنانچه فشار منفذی اولیه، یعنی u_o معادل صفر فرض شود، در این صورت با مقایسهٔ دو معادلهٔ ۱۱-۲ و ۱۱-۴ می‌توان مشاهده کرد که اگر مقدار $\Delta\sigma_1$ معادل با تنش سر بار، یعنی γh فرض شود، در این صورت r_u و $\overline{B}$ معادل خواهند بود.

۱۱-۲-۳- روش‌های کاهش فشار منفذی در حین ساخت [۲ و ۶]

مؤثرترین روش برای کاهش فشار منفذی ایجادشده در مرحلهٔ ساخت، کاهش رطوبت تراکم به میزان ۱ تا ۳ درصد نسبت به رطوبت بهینهٔ پراکتور است. مع‌ذلک، علی‌رغم اینکه این روش توسط بسیاری از مهندسان مورد پذیرش قرار گرفته، برخی دیگر این روش را نمی‌پسندند، چرا که کاهش رطوبت تراکم منجر به ایجاد خاصیت خردشوندگی[1] در خاک می‌شود، ازاین‌رو حساسیت آن نسبت به ترک‌خوردگی ناشی از اختلاف نشست بیشتر می‌شود.

برخی از محققان پیشنهاد می‌کنند که تراکم تحت رطوبت کمتر فقط باید در شرایطی به‌کار گرفته شود که در آن عرض هسته زیاد است و تغییرات شیب ناگهانی در عرض دره مشاهده نمی‌شود.

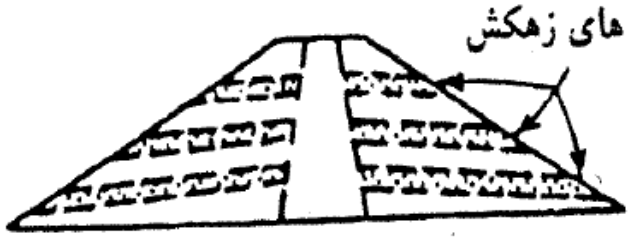
• سدهای خاکی یا هسته فاقد زهکش داخلی موثر بر فشار منفذی در مرکز هسته
(منحنی : بدون زهکش)

ناقد زهکش

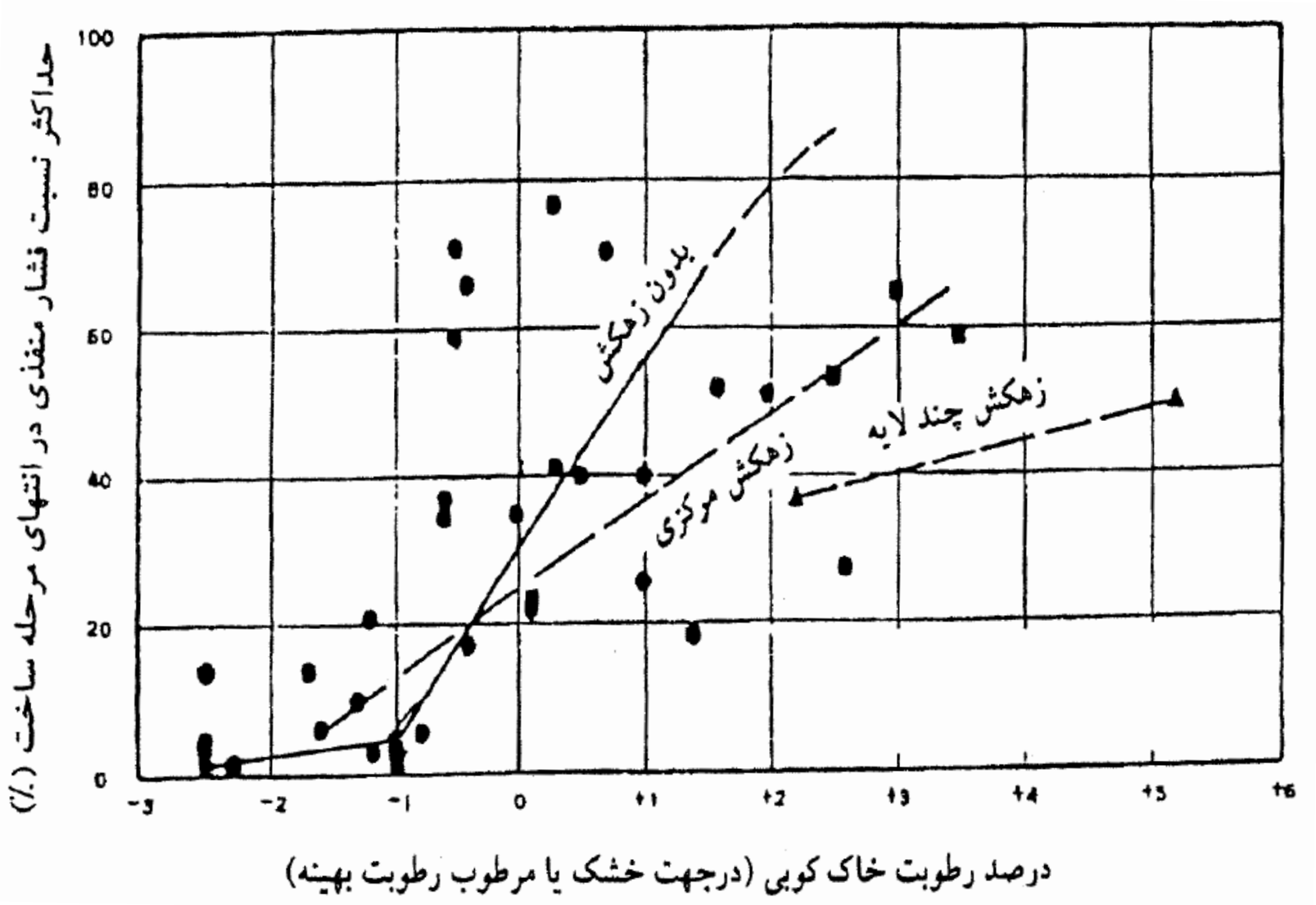
■ سد غیر همگن با زهکش در داخل هسته یا زهکش در موقعیتی که بر فشار منفذی تاثیر گذار است.
(منحنی : زهکش مرکزی)

زهکش افقی و دردکشی

▲ سد دارای یک سیستم زهکش چند لایه
(منحنی : زهکش چند لایه)



شکل ۱۱-۴- تغییرات حداکثر فشار منفذی در انتهای مرحلهٔ ساخت در مقابل رطوبت تراکم خاک


حداکثر نسبت فشار منفذی در انتهای مرحله ساخت (٪)
100
80
60
40
20
0
-3
-2
-1
0
+1
+2
+3
+4
+5
+6
بدون زهکش
زهکش مرکزی
زهکش چند لایه
درصد رطوبت خاک کوبی (درجهت خشک یا مرطوب رطوبت بهینه)

۱۱-۳- فشار منفذی در شرایط نشت پایدار

در تحلیل سد خاکی در شرایطی‌که مخزن آن پر و نشت دائم و پایدار برقرار است، روش تقریباً موردپذیرش همگان، استفاده از تنش مؤثر بر مبنای فشار منفذی ایجادشده بر اثر نشت ثقلی [۱] از داخل سد است. معمولاً توزیع فشار منفذی ناشی از نشت ثقلی با استفاده از روش ترسیمی شبکهٔ جریان تعیین می‌شود، اگرچه روش اجزای محدود نیز در این زمینه قابل استفاده است. تجربه نشان می‌دهد در سدهایی‌که دارای هستهٔ نسبتاً باریکی هستند یا هستهٔ آنها از مصالحی ساخته شده که ضریب نفوذپذیری آن بزرگتر از ۵×۱۰^{-۷} متر در ثانیه است، مقادیر اندازه‌گیری‌شدهٔ فشار نشت با مقادیر نظری به‌دست آمده بر اساس توزیع ثقلی تقریباً همخوانی دارد. در شرایطی‌که هستهٔ سد ضخیم و متشکل از مصالح با نفوذپذیری خیلی کم است، سایر عوامل مانند خاصیت مویینگی [۲]، بارندگی و تبخیر شدید، اثر چشمگیری بر الگوی نشت از داخل بدنهٔ سد دارند. در چنین شرایطی، موقعیت سطح فریاتیک (سطح نشت) کاملاً تعریف شده نبوده و برای بررسی مسئله، روش‌های تحلیل دقیق‌تری مورد نیاز است.

یک روش محافظه‌کارانه، اما ساده‌تر در محاسبهٔ پایداری شیب پایین‌دست سدهای خاکی در حالت برقراری نشت دائم (پایدار)، منظور کردن وزن واحد حجم اشباع خاک در محاسبهٔ نیروهای محرک (نیروهای مماس بر سطح لغزش) و وزن واحد حجم غرقاب در محاسبهٔ نیروهای مقاوم (عمود بر سطح لغزش) است. در هر صورت، باید توجه داشت که در بسیاری از موارد برقراری سطح نشت کامل در شیب پایین‌دست یک سد خاکی معمولاً در زمان نسبتاً طولانی رخ می‌دهد و بعضاً این امر ممکن است سال‌ها به‌طول انجامد. علت این امر آن است که اصولاً حداکثر سطح آب در مخزن سد در مواقع سیلابی و در مدت زمان کوتاه رخ می‌دهد و به سبب مصرف تدریجی آب ذخیره‌شده در پایین‌دست، سطح آب مخزن پایین می‌افتد، درنتیجه ایجاد سطح نشت منطبق با حداکثر سطح آب (که نشان دهنده بدترین حالت در پایداری شیب پائین دست است) در مدت زمان طولانی و در شرایط خاصی امکان وقوع دارد، به همین علت اندازه‌گیری‌های صحرایی نشان می‌دهد که در بسیاری از سدها، حتی پس از گذشت چند سال از شروع بهره‌برداری نیز سطح نشت برقرار نشده است. برای مثال در همین خصوص می‌توان به سد پانزده خرداد اشاره کرد که علی‌رغم گذشت نزدیک به پنج سال از شروع بهره‌برداری، هنوز (تا سال ۱۳۸۰) سطح نشت در آن ثبت نشده است [۱۱].

۱۱-۴- فشار منفذی در مرحلهٔ افت ناگهانی سطح آب

این حالت زمانی رخ می‌دهد که به هر علتی سطح آب در مخزن سد با سرعت پایین آورده شود، به‌گونه‌ای‌که مصالح شیب بالادست فرصت زهکش شدن نیابند. در چنین حالتی، به‌علت اشباع بودن مصالح، جهت جریان و نیروی نشت در شرایطی به سمت شیب بالادست خواهد بود که فشار هیدرواستاتیک آب مخزن به‌دلیل پایین افتادن سطح آب از روی شیب حذف شده‌و این امر موجب ایجاد حالت بحرانی در پایداری شیب مذکور می‌گردد. بدیهی است که در صورت وجود پوستهٔ ضخیم متشکل از مصالح با زهکشی آزاد در بالادست، این حالت بحرانی رفع می‌شود و فشار منفذی و نیروی نشت ممکن است فقط در مصالح کم‌نفوذپذیرتر داخلی ایجاد شود. با توجه به نقش کیفیت مصالح متشکلهٔ شیب بالادست سد در ایجاد شرایط بحرانی در این حالت، موضوع در دو قسمت جداگانه مورد بحث قرار می‌گیرد.

۱۱-۴-۱- خاک‌های تراکم پذیر [1] [۱]

اصطلاح تراکم‌پذیر، به خاک‌هایی اطلاق می‌شود که در آنها حجم آب خارج‌شده از خاک در مقایسه با تغییر حجم خاک که ناشی از کاهش تنش کل است، کوچک می‌باشد. همان‌طورکه اشاره شد، شیب بالادست یک سد خاکی معمولاً در صورت وقوع ناگهانی افت آب در مخزن، به‌دلایل زیر در شرایط بحرانی قرار می‌گیرد:

الف) حذف بار ناشی از وزن آب مخزن روی شیب که به افزایش پایداری کمک می‌کرده است

ب) پخش فشار آب منفذی در داخل مصالح بلافاصله صورت نمی‌گیرد

با پایین رفتن سطح آب در مخزن، اثر پایدارکنندهٔ وزن آب روی شیب حذف می‌شود. چنانچه مصالح متشکلهٔ شیب بالادست دارای نفوذپذیری کم باشد، فشار آب منفذی زیادی در بدنه باقی می‌ماند، در نتیجه موجب ناپایدار شدن شیب مذکور می‌شود.

مقدار کاهش فشار منفذی را می‌توان از رابطهٔ زیر برآورد کرد:

$$\Delta u = \overline{B}\ \Delta\sigma_1 \qquad (۱۹-۱۱)$$

که در آن، $\overline{B}$ پارامتر فشار منفذی اسکمپتون و $\Delta\sigma_1$ برابر میزان تغییر در مقدار تنش اصلی کل است که بر اثر برداشته شدن بار آب مخزن حاصل می‌شود. بنابراین فشار آب u را می‌توان با رابطهٔ زیر بیان کرد:

$$u = u_o + \overline{B}\,\Delta\sigma_1 \qquad (۲-۱۱)$$

که در آن u_o فشار آب قبل از افت می‌باشد که از روی شبکهٔ جریان قابل تعیین است. میزان تغییر در تنش اصلی را می‌توان با توجه به شکل ۱۱-۶ به‌شرح زیر تعیین کرد :
قبل از افت سطح آب :

$$\sigma_1 b = \gamma_c h_c + \gamma_r h_r + \gamma_w h_w \qquad (۲۰-۱۱)$$

که در آن :

γ_c = وزن واحد حجم اشباع هستهٔ رسی

γ_r = وزن واحد حجم اشباع مصالح سنگریز

γ_w = وزن واحد حجم آب

h_c = ارتفاع قائم مصالح هسته روی جزء مورد بررسی

h_r = ارتفاع مصالح سنگریز (پوسته) روی جزء مورد بررسی

h_w = ارتفاع ستون آب روی شیب سد در بالای مقطع

پس از افت سطح آب :

$$\sigma_1 a = \gamma_c h_c + \gamma_{rd} h_r \qquad (۲۱-۱۱)$$

که در آن γ_{rd} وزن واحد حجم زهکشی‌شدهٔ مصالح سنگریز است که برابر ($(\gamma_r - N_s \gamma_w)$) بوده و N_s قدرت زهکشی ویژهٔ مصالح مذکور است (N_s برابر است با حجم آب زهکش‌شده از واحد حجم مصالح اشباع تحت نیروی ثقل)، بنابراین :

$$\Delta\sigma_1 = \sigma_1 a - \sigma_1 b \qquad (۲۲-۱۱)$$

$$\Delta\sigma_1 = -(\gamma_r - \gamma_r d)\, h_r + \gamma_w h_w$$

با قرار دادن مقدار معادل γ_{rd} در رابطهٔ فوق، می‌توان نوشت :

$$\Delta\sigma_1 = -\gamma_w (N_s h_r + \gamma_w) \qquad (۲۳-۱۱)$$

از سوی دیگر، مقدار اولیهٔ فشار منفذی u_o در جزء مورد بررسی تحت شرایط افت سطح آب برابر است با :

$$u_o = \gamma_w(h_c + h_r + \gamma_w h_w - h') \qquad (۲۴-۱۱)$$

که در آن، h' برابر با افت سطح آب روی جزء مورد بررسی است. در این صورت، با توجه به معادلات ۱۱-۹، ۱۱-۲ و ۱۱-۲۴، می‌توان رابطهٔ زیر را نتیجه گرفت :

$$u = u_o + \overline{B}\,\Delta\sigma_۱$$

$$= \gamma_w \left(h_c + h_r + \gamma_w - h'\right) - \overline{B}\,\gamma_w \left(N_s h_r + h_w\right)$$

$$= \gamma_w \left[h_c + h_r(۱ - \overline{B}\,N_s) + h_w(۱ - \overline{B}\,) - h'\right) \qquad (۲۵-۱۱)$$

از طرف دیگر، رابطهٔ بین ضریب فشار منفذی اسکمپتون و $\overline{B}$ به‌شرح زیر است :

$$\frac{\Delta u}{\Delta \sigma_1} = \overline{B} = B\left[1 - (1 - A)\left(1 - \frac{\Delta \sigma_3}{\Delta \sigma_1}\right)\right] \qquad (3-11)$$

برای خاک‌های نزدیک به اشباع، حد بالای ضرایب A و B یک است. در حین افت سطح آب در مخزن سد، تنش اصلی کوچکتر، σ_3، بیشتر از تنش اصلی بزرگتر، σ_1، کاهش یافته و نسبت $\frac{\Delta \sigma_3}{\Delta \sigma_1}$ احتمالاً بیشتر از واحد است. چنانچه مقدار B تقریباً معادل واحد و A کمتر از یک فرض شود، مقدار $\overline{B}$ بیشتر از یک خواهد بود. ازاین‌رو بیشاپ پیشنهاد کرده است که برای یک برآورد محافظه‌کارانهٔ فشار منفذی پس از افت سریع سطح آب در مخزن، می‌توان $\overline{B}$ را معادل واحد در نظر گرفت.

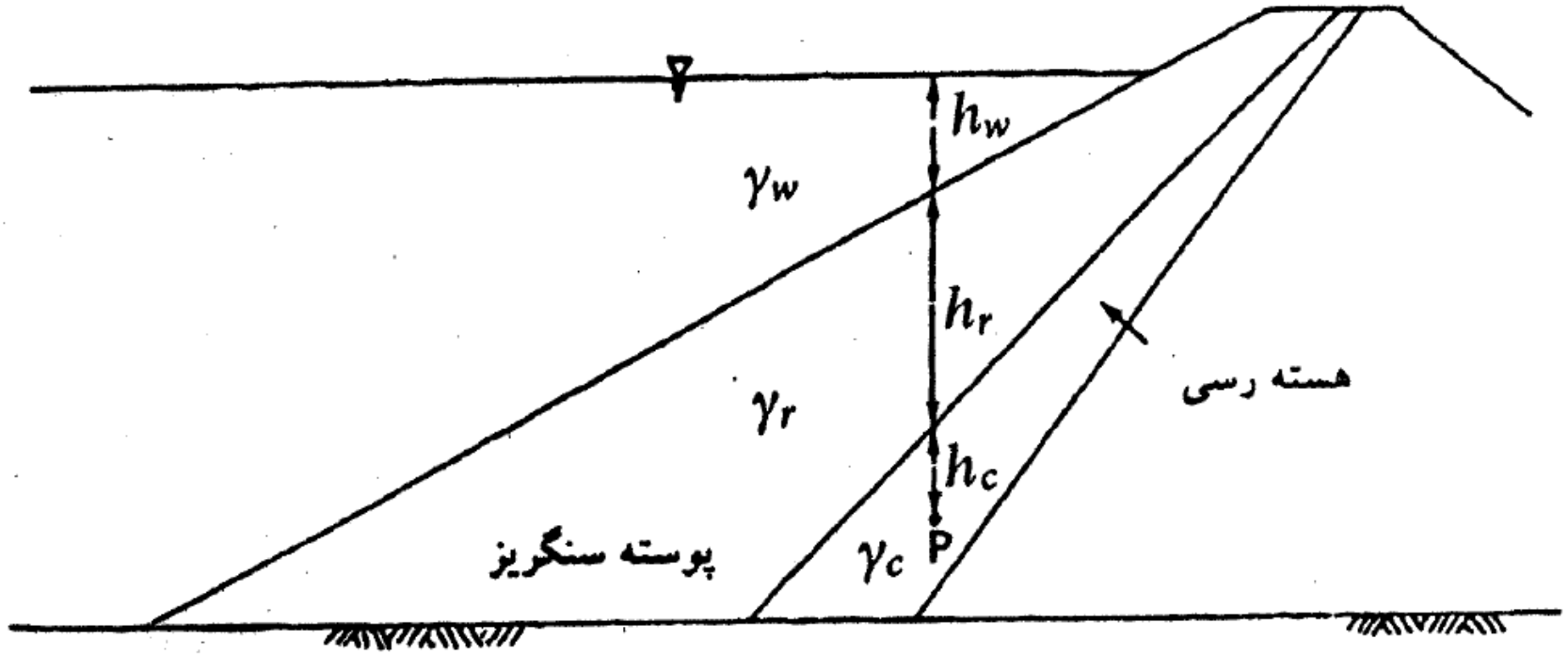
در این صورت :

$$u = \gamma_w [h_c + h_r (1 - N_s) - h']$$ (۲۶-۱۱)

که رابطهٔ فوق در سدهای همگن به‌صورت زیر تبدیل خواهد شد :

$$u = \gamma_w (h_c - h')$$ (۲۷-۱۱)

تجربه نشان داده که پذیرش مقدار واحد برای $\overline{B}$ برای نقاطی‌که فشار نشت در آنها زیاد است، قابل قبول و دارای دقت کافی است، مع‌ذلک در سدهای کوتاه، مطمئن‌تر آن است که مقدار $\overline{B}$ برابر ۰/۷ تا ۰/۸ درنظر گرفته شود.



شکل ۱۱-۶- تعریف پارامترهای به‌کار برده شده در محاسبهٔ تغییر تنش در نقطهٔ P

راینوس [1] برای بیان قدرت تخلیهٔ پوسته در هنگام افت ناگهانی سطح آب و تعیین سرعت افت بحرانی، یک پارامتر بدون بعد نسبت راینوس به‌شرح زیر پیشنهاد کرد [۱۰]:

$$k_m = \frac{k}{N_s . V} \qquad (۲۸-۱۱)$$

که در آن :

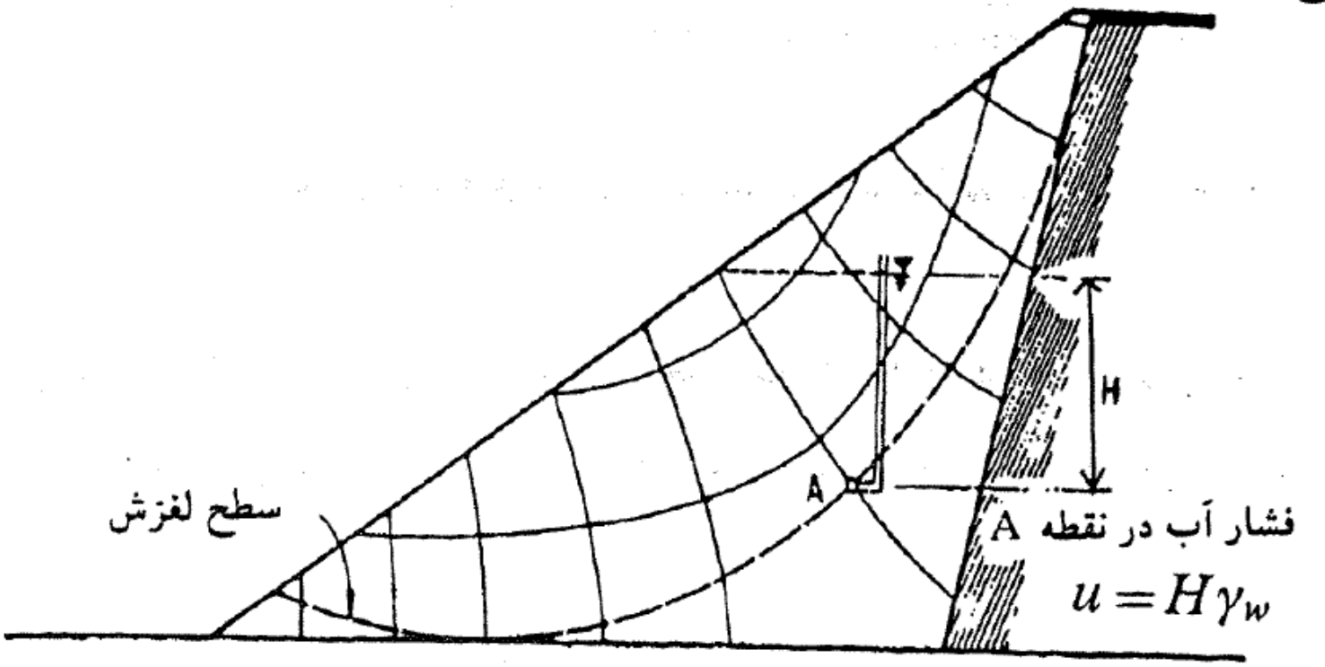
k_m = نسبت راینوس　　N_s = قابلیت زهکش ویژه

k = ضریب نفوذپذیری مصالح پوسته　　V = سرعت افت سطح آب

بر اساس مطالعات Goel و همکاران (۱۹۸۶)، چنانچه k_m بزرگتر از ۵۰ باشد، مقدار فشار منفذی ناشی از افت ناگهانی سطح آب ناچیز خواهد بود. بر همین اساس، سرعت بحرانی افت سطح آب معادل ۱۷ سانتی در روز به‌دست آمده و سازمان عمران آمریکا سرعت بحرانی را معادل ۰/۵ فوت (۱۵ سانتی‌متر) در روز پیشنهاد کرده است.

۱۱-۴-۲- خاک‌های تراکم ناپذیر [۱]

خاک‌های تراکم‌ناپذیر، خاکهایی هستند که در آنها حجم آب جریان‌یافته به خارج در حین افت سطح آب در مقایسه با افزایش حجم ناشی از تغییر تنش زیاد است. در این حالت، برای حل مسئله باید از روش رسم شبکهٔ جریان با مرزهای متحرک استفاده کرد. حالت حد، افت یک‌باره و آنی سطح آب است، یعنی حالتی‌که در آن بنابر شکل ۱۱-۷، تغییر در سطح نشت یا فریاتیک حاصل نمی‌شود.



شکل ۱۱-۷- شبکهٔ جریان حین افت سریع سطح آب

این روش در بیشتر مواردی‌که هسته از مصالح غیر قابل‌تراکم و بسیار کم‌نفوذ ریزدانه تشکیل یافته است، به‌کار برده می‌شود. البته بدیهی است که این شرایط محافظه‌کارانه بوده و در سازه‌های بزرگ و مهم باید این واقعیت را در نظر گرفت که سطح آزاد و شکل الگوی جریان (به ازای شکل هندسی خاص مقطع) تابع عوامل زیر است :

- سرعت افت سطح آب V
- نفوذپذیری مصالح k

مطالعات راینوس نشان داده که در مورد مصالح تراکم‌ناپذیر، چنانچه مقدار k_m (رابطهٔ ۱۱-۲۸)، بیشتر از ۲۵۰ باشد، سرعت زهکش شدن و تخلیهٔ پوسته با سرعت افت سطح آب یکسان است و بر اثر این پدیده فشار آب منفذی در پوسته ایجاد نخواهد شد [۱۰]