

#### ٤ - تصميم السدود الترابية Earth dams

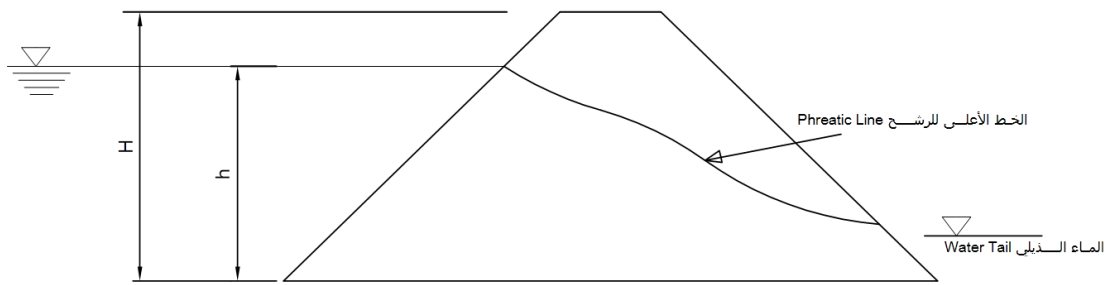
##### ١-٤ المقدمة

بنيت السدود الترابية Earth dams لتخزين مياه الري منذ القدم . تطور ميكانيك التربة لدراسة سلوك السدود الترابية Earth dams ، و تطور تقنيات الأنشاء الحديثة المتميزة الأفضل ، كل هذا ساعد في خلق ثقة في إنشاء سدود ذات ارتفاعات كبيرة بتصاميم أكثر أماناً وأقل كلفة.

##### تعريفات

التأبيب : هو نحر داخل جسم السد Embankment أو في طبقة الأساس ، والذي يؤدي إلى انجراف حبيبات التربة وتكون فراغات تشبه الأنابيب داخل جسم السد Embankment أو في الأساس .

الخط الأعلى للسريان phreatic line : هو الخط الذي يفصل بين نطاق التربة المشبعة و نطاق التربة الغير المشبعة.



التربة الإيزوتروبية isotropic soil : هي تربة ذات خواص واحدة في جميع الاتجاهات ، أي لا تتغير خصائصها الطبيعية بتغير الاتجاه .

الضاغط المائي head of water : الضاغط المائي head of water عند نقطة هو الارتفاع العمودي للماء الذي يشكل ضغط مساوي للضغط المسلط عند تلك النقطة و يقاس بوحدة الطول (m)

الهبوط المفاجئ drawdown : هو الانخفاض السريع في مياه بحير السد.

#### ٢-٤ أساسات السدود الترابية Earth dams

المتطلبات الأساسية لأساسات السدود الترابية Earth dams هي :

- ١ . يجب أن تعمل الأساسات على استقرار ودعم وزن السد في جميع الحالات من ناحيتي التشبع والأحمال
- ٢ . يجب أن تحقق الأساسات مقاومة كافية للتسرب لمنع انجراف الحبيبات الناعمة من التربة نتيجة مرور المياه وتكون أنابيب لعبور المياه عبر الأساس والتي تؤدي إلى انهيار السد كذلك يجب أن تحقق الأساسات مقاومة كافية للفاقد المفرط للمياه .

عموماً يمكن تصنيف الأساسات إلى ثلاثة أصناف رئيسية .

- ١ . أساسات صخرية .
- ٢ . أساسات منفذة .
- ٣ . أساسات كتيمية .

##### ١-٢-٤ الأساسات الصخرية

لا يوجد أي مشاكل في الأساسات الصخرية من ناحية قدرة التحمل . ولكن عادة يتم حقن هذه الأساسات لحشو الصدوع والشقوق التي قد يحتويها هذا النوع من الأساسات . يمكن إنشاء أي نوع من أنواع السدود الترابية Earth dams على هذا النوع من الأساسات .

#### ٤-٢-٢ الأساسات النفوذة

هذا النوع من الأساسات يضم مشكلتين :

١. كمية مفرطة للتسرب
٢. حدوث انابيب ونبوع المياه بسبب قوى الرشح

الحل للسيطرة على هذين المشكلتين يحدد بسماكة الطبقة النفوذة تمتد إلى

(a) عمق محدود

(b) عمق كبير

هناك مشكلة أخرى رئيسية تتمثل بظاهرة معروفة بالتميع ، ككومة من الرمل المنتظم الناعم في حالة عدم التراص (سائب) عندما يعرض لفعل مفاجئ كصدمة (كما يحصل في السدود الترابية Earth dams ) فإنه يفقد كل قوى القص ويتصرف كمائع لزج . تُصور هذه الظاهرة بالرمل المنتظم و الذي يكون ناعم جداً ويتألف من حبيبات دائرية .

#### ٤-٢-٣ الأساسات الكثيمة

الأساسات الطميية (silt) و الطينية التي تمتد إلى أعماق كبيرة تكون ذات كثامة كافية لتحول دون المتطلبات الضرورية لحل مشكلة التسرب و تكون انابيب لعبور المياه عبر الأساس ، المشكلة الرئيسية مع هذا النوع من الأساسات قد تكون ضغط الماء الصافي و التشوهات الملحوظة .

#### ٤-٣ أسباب فشل السدود الترابية Earth dams

ينهار السد الترابي بسبب التصميم الخاطئ و كثيراً ما يكون بسبب الاعتماد على تحريات غير كافية و قلة العناية في التنفيذ و الصيانة . يمكن تصنيف فشل السدود الترابية Earth dams إلى الأقسام الأساسية التالية :

١. الفشل الهيدروليكي
٢. الفشل الانشائي
٣. الفشل بالرشح

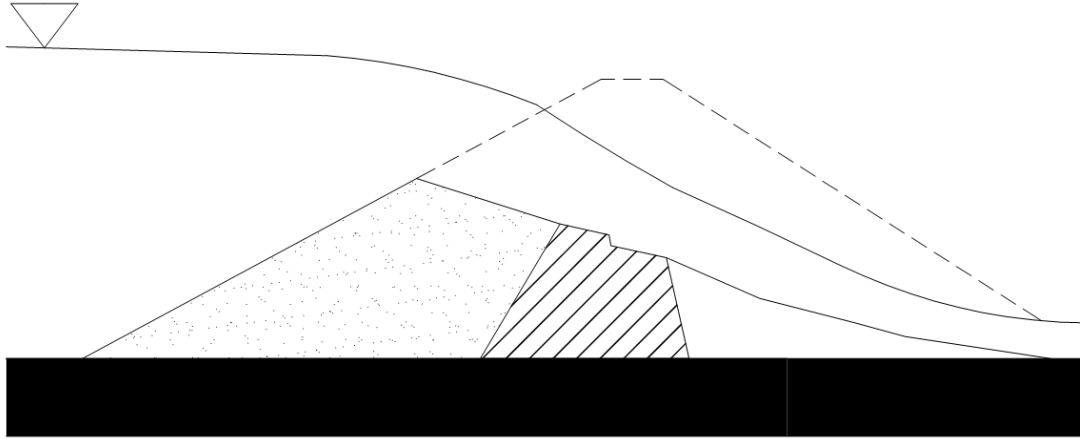
#### ٤-٣-١ الفشل الهيدروليكي

ثلث فشل السدود هو فشل هيدروليكي وتنتج عن تعرية جسم السد بالماء surface erosion . الفشل الهيدروليكي يتضمن التالي :

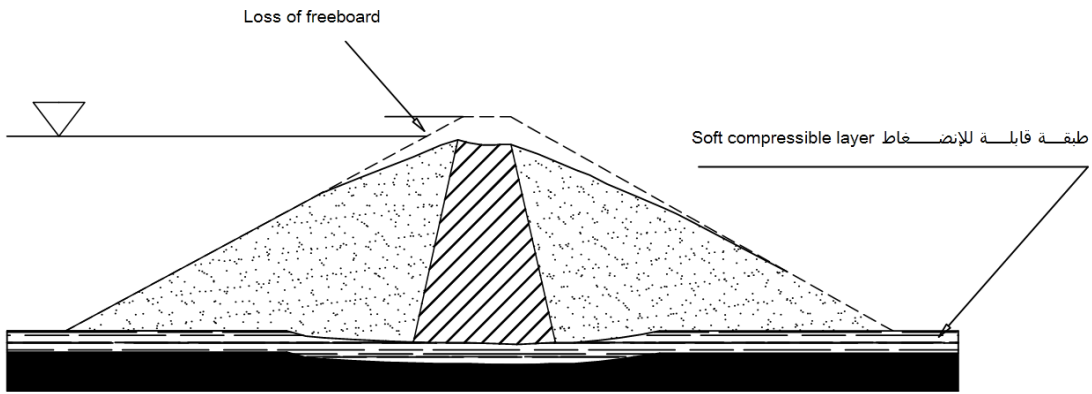
#### ١. الانهيار بالغمر Overtopping

قد يحدث الغمر في السد الترابي (كما في الشكل (٤-١)) إذا :

- (a) كمية الفيضان التصميمي design flood المخمن سابقاً أقل من كمية الفيضان الذي سيحدث في فترة عمر السد لعدم تقدير كمية الفيضان بالشكل الصحيح .
- (b) سعة المفيض spillway غير كافية لإمرار موجات الفيضان
- (c) عيوب faulty ومشاكل في تشغيل بوابات المفيض spillway gates
- (d) هبوط في الأساسات أو الضفة Embankment (كما في الشكل (٤-٢))



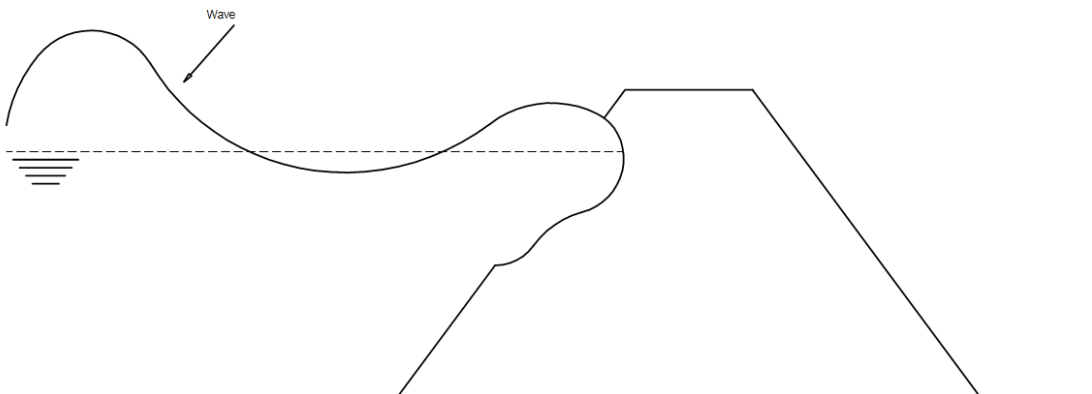
الشكل (١-٤) انهيار السد بسبب الغمر



الشكل (٢-٤) هبوط settlement أساس السد الذي يدل على انخفاض فضلة الارتفاع Freeboard

## ٢. نحر الموجة Wave erosion

تأثير الموجات هو أنها تتلم جسم السد Embankment من الميل الأمامي U/S في حالة عدم وجود الحماية الأمامية (كما في الشكل (٣-٤))



الشكل (٣-٤) نحر الموجة Wave erosion في الوجه الأمامي للسد

### ٣. النحر في الميل الخلفي (المؤخرة) للسد Toe erosion

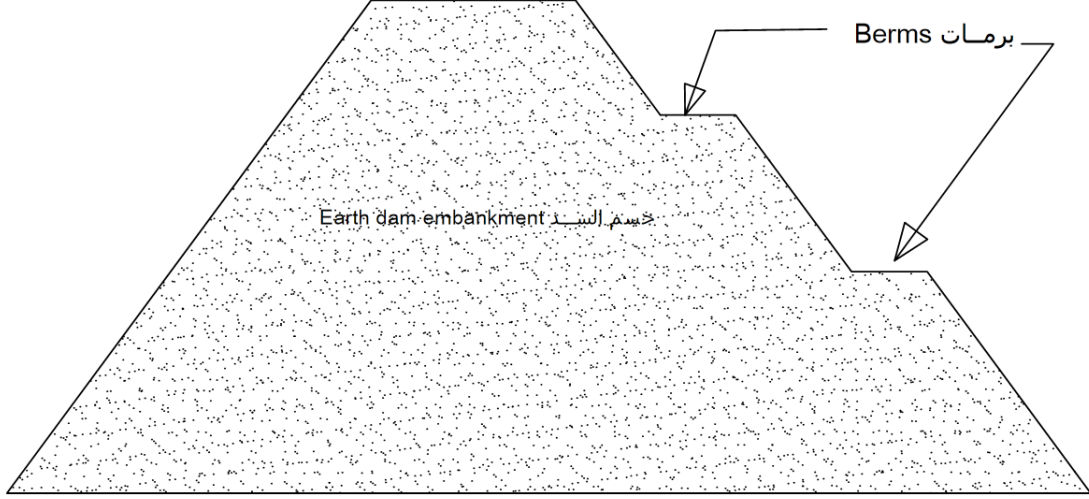
يحدث النحر في مؤخرة السد في حالة التصميم السيئ لقنوات المفيض وأو اختيار مكانها . ويسببه:

a. النحر بسبب الماء الذيلي water tail

b. النحر بسبب المياه الخارجة من المفيض أو البوابات

٤. الأخاديد Gullying

تحدث الأخاديد بسبب جريان مياه الأمطار الغزيرة على ميل مؤخرة السد إذا لم يعمل حماية لها . لمنع حدوث ذلك يعمل لميل مؤخرة السد برمات Berms (كما في الشكل (٤-٤))

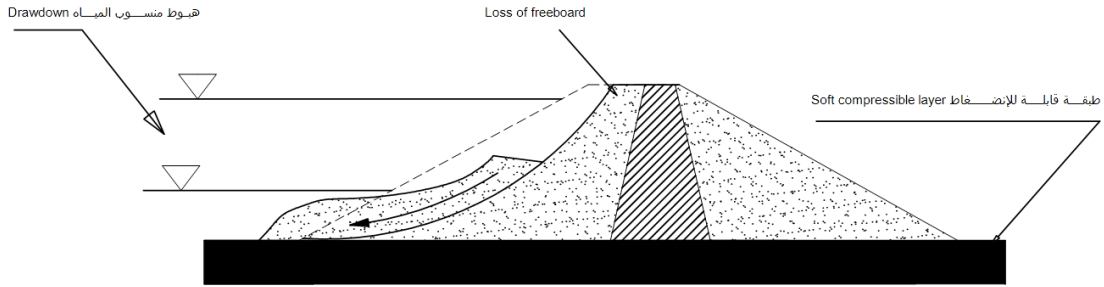


الشكل (٤-٤) تزويد مؤخرة السد ببرمات Berm

### ٤-٣-٢ الفشل (الانهيار) الإنشائي Structural failure

١. الانهيار في مقدمة السد بسبب الانخفاض المفاجئ للمياه في بحيرة السد

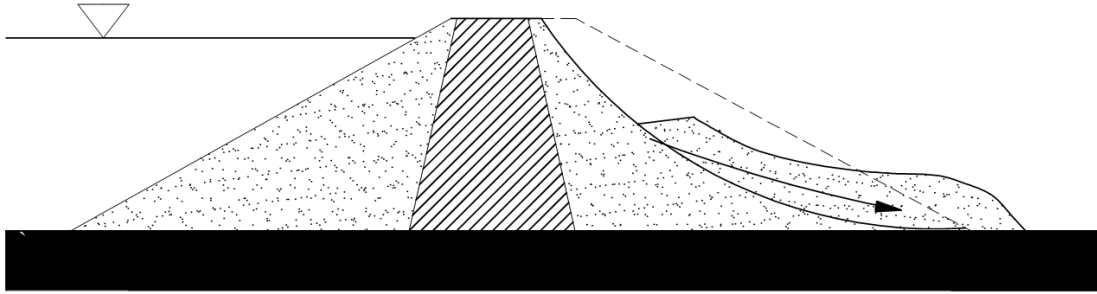
مع الافراغ الكامل لمياه بحيرة السد القوى الناتجة عن الضغط المسامي للمياه pore water pressure التي تؤثر على طول ميل مقدمة السد ومع انعدام الضغط الهيدروستاتيكي Hydrostatic Pressure اللازم لموازنة فعل الضغط المسامي للمياه لذلك يحدث انهيار ميل مقدمة السد (كما في الشكل (٤-٥))



الشكل (٤-٥) انهيار ميل مقدمة السد بسبب الانخفاض المفاجئ في منسوب المياه

## ٢. الانهيار في ميل مؤخرة السد في حالة امتلاء بحيرة السد

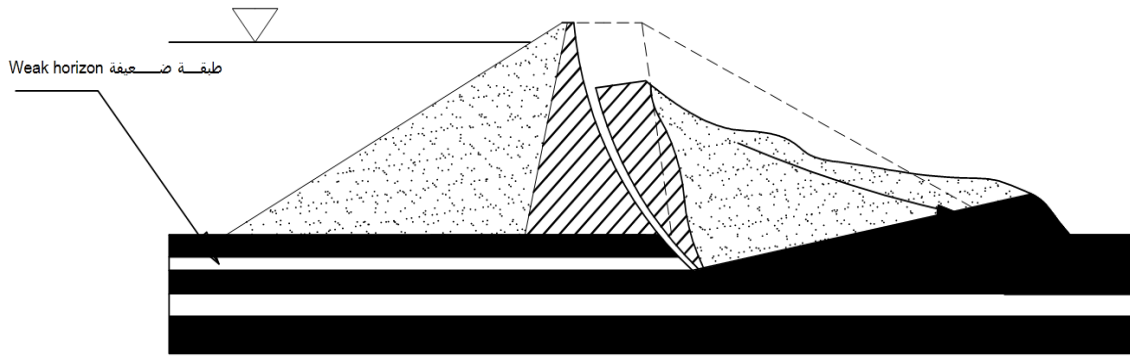
الحالة الحرجة لميل مؤخرة السد (كما في الشكل (٦-٤)) هي في حالة امتلاء بحيرة السد بالمياه و التسرب في هذه الحالة في أعلى نسبة له. لذلك يحدث انهيار ميل مؤخرة السد و كذلك عندما تكون مؤخرة السد ذات ميل حاد.



الشكل (٦-٤) انهيار مؤخرة السد في حالة امتلاء بحيرة السد بالمياه downstream failure

## ٣. الانهيار في ميل مؤخرة السد بسبب ضعف طبقة الأساس

يحصل الفشل في ميل مؤخرة السد عند ما تصل الاجهادات على طبقة الأساس إلى قيمة أعلى من قدرة تحملها عند وجود طبقة ضعيفة في الأساس (كما في الشكل (٧-٤))



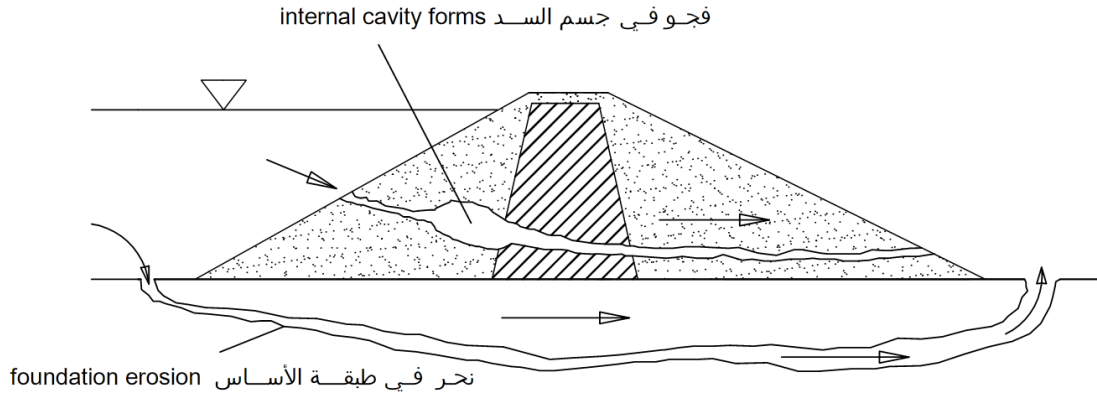
الشكل (٧-٤) انهيار ميل مؤخرة السد بسبب ضعف طبقة الأساس

## ٣-٣-٤ الفشل بالرشح Seepage failures

لا يمكن السريان من السدود الترابية وعادة لا يؤثر على السد . ولكن السريان الغير مسيطر عليه قد يسبب نحر داخل جسم السد Embankment أو في طبقة الأساس ، والذي يؤدي إلى انجراف حبيبات التربة وتكون فراغات تشبه الأنابيب داخل جسم السد Embankment أو في الأساس ، أو حدوث انسلاخ لميل المؤخرة . الشكل (٨-٤) يوضح ذلك .

## ١. الانهيار بسبب تكون فراغات تشبه الأنابيب (النخر) Failure due to piping

النخر هي عملية نحر مستمرة والتي يتنامى تطورها عبر جسم السد Embankment أو تحته ( الشكل (٨-٤)) . تبدأ من نقطة يتركز عندها السريان حيث الانحدار الهيدروليكي hydraulic gradient ذو ارتفاع كافي لتكوين سرعة تحدث نحر . إذا كانت القوى المقاومة للنحر (التلاصق بين حبيبات التربة) ذات تأثير يمكن أخذه بالحسبان ، ووزن حبيبات التربة في ميل المؤخرة . أقل من اللازمة لمقاومة النحر فانه يؤدي إلى التسبب في النخر . تغسل حبيبات التربة إلى خارج جسم السد Embankment و تسبب الانهيار بالنخر.



الشكل (٨-٤) النحر الداخلي و تكون فراغات تشبه الأنابيب

السريان خلال أو تحت جسم السد Embankment قد يقوم بالتالي :

- يولد قوى تزيح حبيبات التربة من المنشأ الترابي
- التدفق Flow مع الضغط المسامي pore water pressure يمكن أن يدفع أجزاء التربة ويسبب حدوث فقائيع مثل الغليان boiling
- التشكلات والمسارات المفتوحة open conduit عبر التربة تسبب فوادم عالية من المياه
- ضغط الماء المسامي pore water pressure يقلل من مقاومة التربة

## ٢. الانهيار بسبب انسلاخ ميل المؤخرة Failure due to sloughing of D/s

تحت حالة الخزن الكامل لبحيرة السد ميل مؤخرة السد يبقى مشبعاً ينتج عن ذلك سقوط صغير من مؤخرة السد الذي يترك خلفه ميل أشد انحداراً مما كان عليه و بحدوث السقوط مرة أخرى يؤدي إلى ميل وأجدة أشد انحداراً من السابق وأقل استقراراً . يمكن أن تستمر هذه العملية إلى أن يصبح الجز المتبقي من السد وحده يقاوم الضغط ويحدث انهيار فجائي لكامل السد .

## ٤-٤ معايير تصميم السدود الترابية Design Criteria of Earth Dams

المعايير التالية لتصميم السدود الترابية تستند إلى ، الخبرات والتجارب في أسباب الانهيار ، والتي يلزم أخذها بعين الاعتبار لتصميم سدود ترابية أكثر أماناً .

١. لمنع حدوث الفشل الهيدروليكي فإنه يجب تصميم السد مع الأخذ في الاعتبار منع حدوث النحر .

هذا يتضمن الحالات التالية

- (a) تصميم المفيض بحيث تكون سعته كافية ليعبر أكبر فيضان متوقع
- (b) المنسوب الأعلى للسد أعلى من ارتفاع الموجة في حالة المنسوب الأعلى للمياه في بحيرة السد
- (c) الارتفاع الكلي بعد حدوث الهبوط يجب أن يحتفظ بأقل فضلة عمق أمانة من الغمر.
- (d) لا يحدث النحر بفعل الموجات
- (e) عرض القمة بشكل كافٍ لكي تتحمل ارتطام الأمواج والهزات الأرضية .

٢. لمنع حدوث الفشل بالسريان seepage failure .سريان الماء داخل جسم السد Embankment والأساس يجب ألا يكون كبيراً بما فيه الكفاية ليؤدي إلى عدم تحقيق الهدف الذي أنشئ السد من أجله ولا يكون الضغط كبيراً بما فيه الكفاية ليسبب التآبيب .

هذ يتضمن الحالات التالية والتي سنكتفي بذكرها .

- (a) كمية الرش من المياه خلال مقطع السد والأساس يجب أن تكون محدودة.
- (b) خط السريان seepage line يجب أن يكون في حدود ميل مؤخرة السد لكي لا يسبب انسلاخ في السد.
- (c) جريان الماء خلال جسم السد Embankment أو الأساس لا يحرك حبيبات التربة (لكي لا يكون فراغات تشبه الأنابيب) (التأنيب) .
- (d) يجب ألا يحدث تسرب للمياه التي تنقل من مقدمة السد إلى وجه ميل المؤخرة ، كالتسرب الذي قد يحصل من القنوات عند المفاصل بين المقطع الترابي و الخرساني أو عبر الثقوب التي يصنعها الحيوانات ، عموماً يجب ألا يحدث تسرب إلى جسم السد Embankment والأساسات سواء من الأنابيب أو القنوات التي تستخدم لنقل المياه من البحيرة إلى خلف السد أو أي ثقوب أخرى .

٣. لمنع حدوث الفشل الإنشائي ، يجب أن يكون جسم السد Embankment والأساسات مستقرة تحت جميع الحالات .

وهذا يتضمن التالي :

- (a) يجب أن يكون ميل مقدمة السد و ميل مؤخرة السد مستقر تحت جميع حالات التحميل والتي قد تتضمن أحمال الهزات الأرضية .
- (b) يجب أن تكون إجهادات القص على الأساس ضمن الحدود المسموحة لمقاومة القص لمادة الأساس .

#### ٤-٤ تصميم مقطع السد الترابي Cross section design of an earth dam

يتم التصميم الأولى للسدود الترابية بالإعتماد على الخبرات السابقة ، و الاستفادة من السدود المنفذة في السابق تحت نفس الظروف .

#### ٤-٤-١ عرض القمة Top width

عرض القمة (Crest width) يجب ألا تقل على ٤ متر ، لأغراض الصيانة . تعتمد عرض القمة لمقطع السد على العديد من الاعتبارات ، ولكن في الواقع العملي يمكن ايجادها باستخدام المعادلات العملية ، كالمعادلة التالية:

$$b = \frac{5}{3} \times \sqrt{H} \quad (4.1)$$

$$H = h + F.B \quad (4.2)$$

حيث b عرض قمة السد ، و H ارتفاع مقطع السد

h ارتفاع الماء أمام السد في بحير التخزين

F.B فضلة الارتفاع

يمكن أخذ ميل المقدمة (Upstream) و المؤخرة (downstream) للسود الترابية من الجدول (٤-١) الموصى به من قبل ترزاجي Terzaghi .



نوع المواد	ملاحظات	ميل المقدمة Upstream slope	ميل المؤخرة downstream slope
مواد متجانسة جيدة التدرج	-	2.5:1	2:1
سلت خشن متجانس	-	3:1	2.5:1
سلت طيني متجانس أو طين	الارتفاع أقل أو يساوي 15 متر	2.5:1	2:1
	الارتفاع أكبر أو يساوي 15 متر	3:1	2.5:1
رمل أو رمل وحصي	مع نواه طينية	3:1	2.5:1
	مع نواه جدار من الخرسانة المسلحة	2.5:1	2:1

جدول (٤-١): ميول السدود الترابية وفقاً لما أوصى به ترزاغي Terzaghi

ملاحظات :

- في السد الترابي المتجانس ميول عادي للنواه ، لأن السد كله نواه
- في السد الترابي المركب من مواد ناعمة (النواه) ومواد خشنة تكون ميول النواه حادة وتسد بمواد خشنة من الجانبين
- نعتمد الجدول للاختيار الأولي للميول قبل التصميم .
- بعد التصميم وإجراء التعديل على الميول ، أو إبقاء الميول كما هي دون تعديل ، نقوم بتحليل السد الترابي كما سيتم تفصيله لاحقاً .
- أقل ميل مسموح به في المقدمة والمؤخرة في السدود الترابية 3.5(horizontal):1(vertical) لأن أقل من هذا الميل لن يكون اقتصادي في معظم الحالات

٤-٤-٤ النواة The core

تعتمد السماكة الدنيا الآمنة minimum safe thickness للنواة المركزية الكثيفة على العوامل التالية :

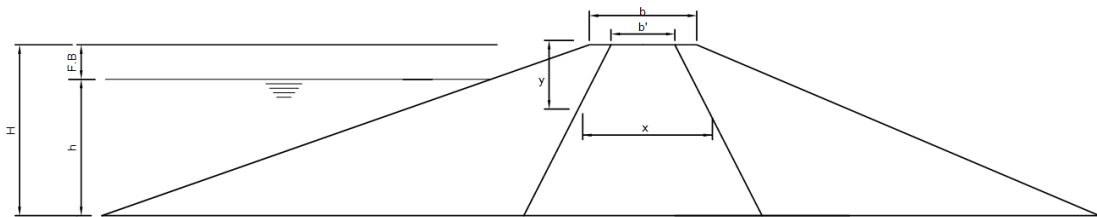
١. كمية فواقد السريان .
٢. سماكة ملائمة عند التنفيذ .
٣. نوعية المواد المتوفرة (نواه أو صفيحة) .
٤. طبقات الفلتر المقترحة .
٥. مشاريع سابقة مشابهة .

المعايير الدقيقة لتصميم السدود الترابية .

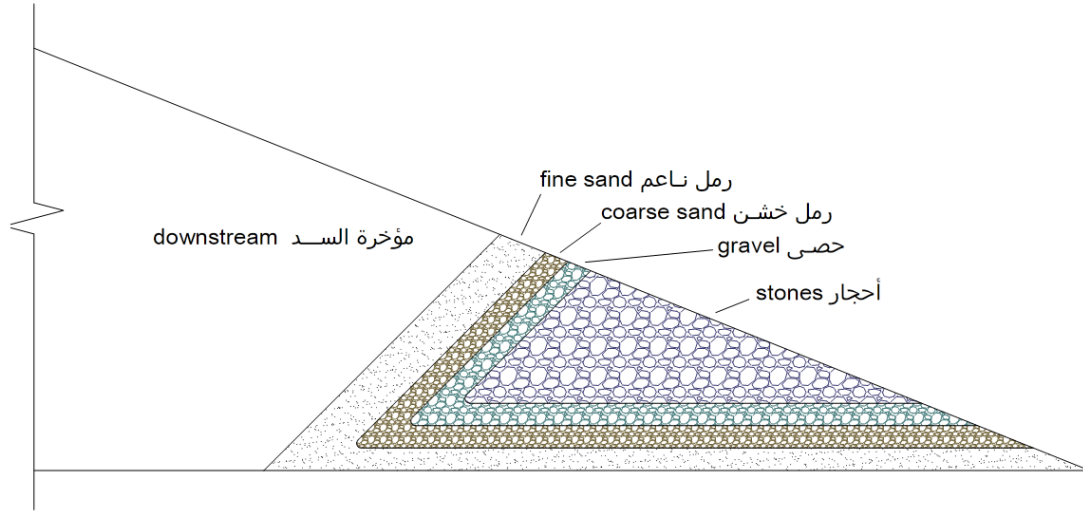
١. سماكة النواة (x) عند أي مستوى ، لا تكون أقل من الارتفاع (y) لجعل الانحدار الهيدروليكي *hydraulic gradient* أقل من الواحد ، لأن الانحدار الهيدروليكي *hydraulic gradient* مساوي للقيمة (i=y/x) حسب قانون دارسي لسريان الماء في التربة.
٢. يجب أن تكون سماكة النواة عند القمة ٣ متر أو أكثر لتحقيق متطلبات الإنشاء .
٣. يجب أن تكون قمة النواة على ارتفاع واحد متر على الأقل ، فوق المنسوب الأعلى للمياه Maximum water level لمنع حدوث الرشح .

ملاحظة :- يفضل أن يكون منسوب قمة النواة مع منسوب قمة السد

- في النواة دائماً (x) أكبر من (y)



ارتفاع المرشح الطرفي Rock Toe عموماً يبقى بين ٣١ إلى ٤١ من ارتفاع السد (H) يمكن أخذ الميل لواجه التصريف (الوجه الداخلي) للمرشح الطرفي ١:١ و الوجه الخارجي هو امتداد لميل مؤخرة السد .



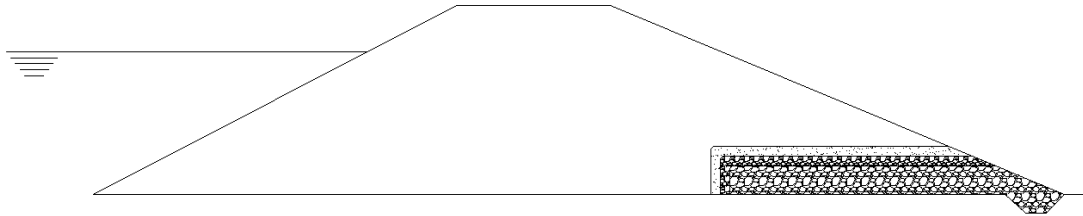
الشكل (١٠-٤) المرشح الطرفي Rock toe

#### ٢-١-٥-٤ مرشح الفلتر الأفقي Horizontal drainage filter

إن مرشح الفلتر الأفقي Horizontal drainage filter مناسب للسدود التي أساسها أو جزء منه تحت ميل مؤخرة السد غير منفذة حيث تؤثر قوى الرشح بضغط رفع إلى الأعلى . يمتد مرشح الفلتر الأفقي Horizontal drainage filter من ٢٥% إلى ١٠٠% من طرف مؤخرة السد إلى خط مركز السد . وعموماً بطول ثلاثة أضعاف ارتفاع السد يكون كافي . هو عموماً مركب من مرشح البساط الأفقي والمرشح طرفي (كما في الشكل (١١-٤)).

يعمل مرشح الفلتر الأفقي Horizontal drainage filter للأغراض التالية:

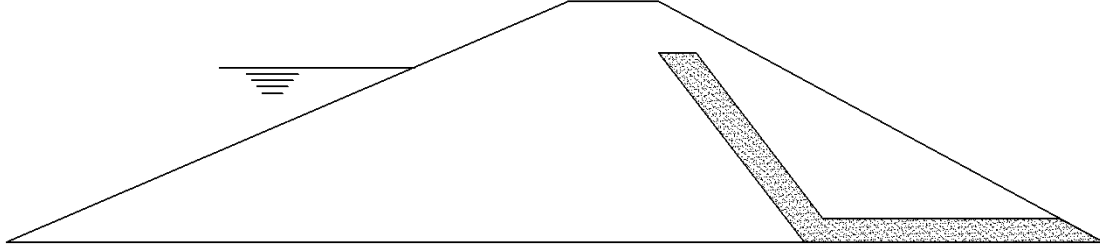
- (a) ليحافظ على الخط الأعلى للسريان *phreatic line* ضمن مقطع السد.
- (b) كمرشح للأساسات .



الشكل (١١-٤) مرشح الفلتر الأفقي Horizontal drainage filter

#### ٣-١-٥-٤ المرشح المائل Chimney drain

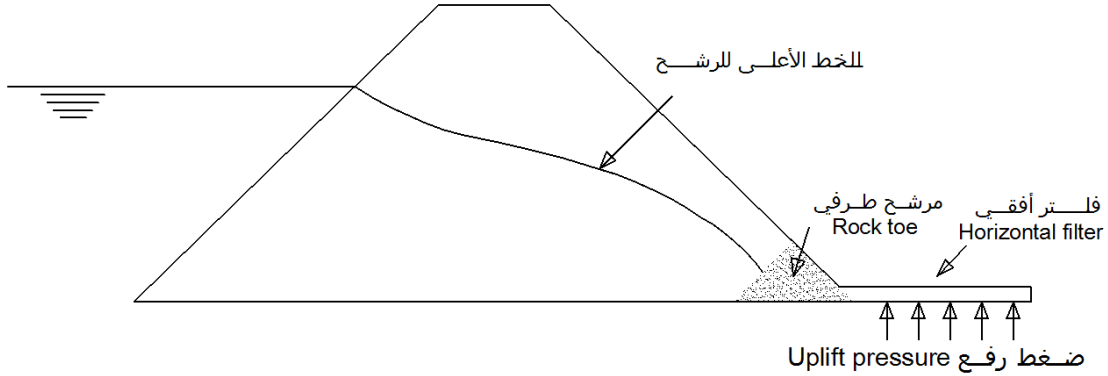
عندما يكون هناك درجة عالية من التطبيق في جسم السد ، يصبح مرشح الفلتر الأفقي Horizontal drainage filter غير مجدي inefficient وتصبح المراشح المائلة أو الرأسية inclined or vertical chimney drain هي المناسبة في العديد من السدود المتجانسة لمواجهة سريان المياه قبل وصولها إلى ميل مؤخرة السد downstream slope (كما في الشكل (١٢-٤))



الشكل (١٢-٤) المرشح المائل Chimney drain

#### ٤-١-٥-٤ فلتر ميل المؤخرة (Filter D/S) للمرشح الطرفي Rock toe

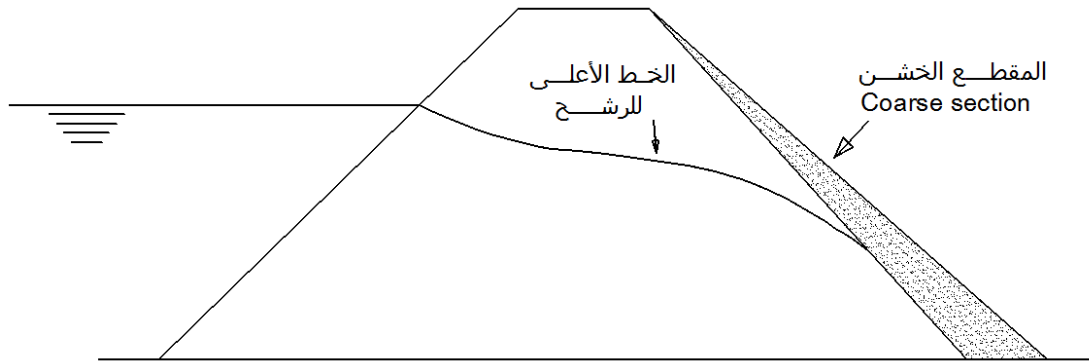
يضاف فلتر ميل المؤخرة (Filter D/S) كوزن إضافي لجعل تدفق المياه الصاعدة إلى سطح التربة خلف السد آمن بحيث لا تسبب تصاعد حبيبات الرمل (غليان الرمل sand boiling) الشكل (١٣-٤)



الشكل (١٣-٤) فلتر ميل المؤخرة (Filter D/S) للمرشح الطرفي Rock toe

#### ٥-١-٥-٤ مرشح المقطع الخشن D\S coarse section

تزود ميل المؤخرة بمقطع خشن D\S coarse section كما هو موضح بالشكل (١٤-٤) ، لاعتراض المياه السارية خلال جسم السد ، وجعل ميل مؤخرة السد آمنة ضد التآبيب . كذلك تزيد من مقاومة الهزات الأرضية.



الشكل (١٤-٤) مرشح المقطع الخشن D\S coarse section

#### ٢-٥-٤ التحكم بالرشح عبر الأساسات Foundation seepage control

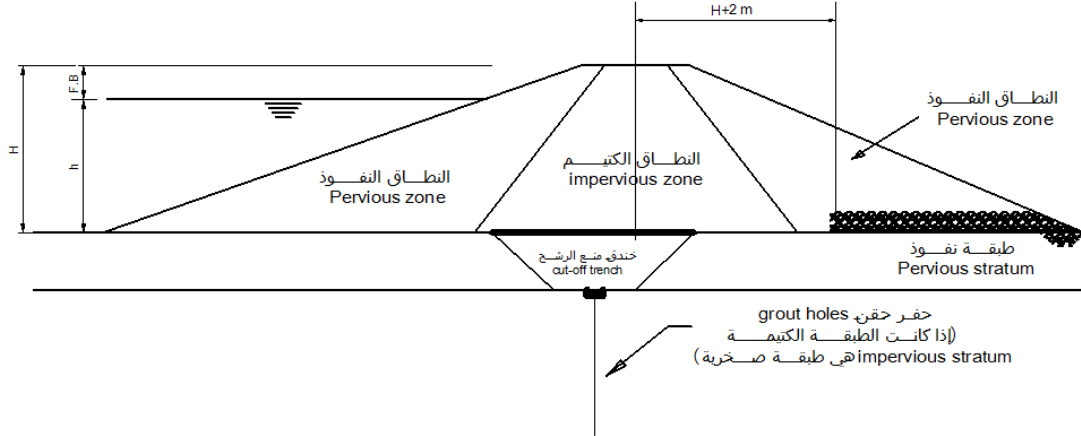
هناك عدة طرق للتحكم بمرريان المياه عبر الأساسات . إن ملائمة طرق المعالجة يعتمد أولاً على طبيعة الأساس . من هذه الطرق نذكر ، الحقن (الحشو) grouting وستارة الحقن grout curtain ، خنادق منع الرشح cut of trenches ، جدار صفائحي أو أي جدار آخر مانع للرشح partial cut-off ، و الصفائح الخازوقية sheet piling cut-off ، و السجادة (البساط) الأمامية الكتيمية upstream blanket ، وأبار تخفيف الضغط pressure relief wells ، وهذه الطرق ستناقش في الفقرات التالية :

#### ١-٢-٥-٤ الحقن (الحشو) grouting وستارة الحقن grout curtain

من مواد الحقن المستخدمة ، الإسمنت cement ، الأسفلت asphalt ، والطين clay ومواد كيميائية أخرى تستخدم كمادة حقن . وقد يستخدم مع هذه المواد الرمل كمادة مالئة عندما تكون الفراغات الموجودة بالأساس كبيرة . عندما تحقن هذه المواد وتتملء الفراغات الموجودة في الأساس فإنها تعمل كرابط binder ومالئ fill لفراغات voids . وهذا يقلل من نفاذية permeability الأساس ويزيد من استقراره . إن اختيار مادة الحقن وعمق الحقن يرتبط بنوع وحالة الأساس ، ونوع وارتفاع السد . وأيضاً عدد خطوط الحقن والمسافات بين الحفر يعتمد على طبيعة الأساس .

#### ٢-٢-٥-٤ خنادق منع الرشح cut of trenches

تشيد خنادق البتر (منع الرشح) cut of trenches مع ميل جانبي كما في الشكل (١٥-٤) أو رأسية vertical وهي خرم في الأساس تحت جسم السد Embankment يملأ من المواد المستخدمة في إنشاء السد بحيث يتكون اتحاد جيد من المواد الكتيمية impervious . موقع الخندق في مقدمة السد عند خط مركز السد . يحافظ على الخط المركزي للخندق موازي للخط المركزي للسد . يجب أن يصل عمق الخندق إلى سطح الطبقة الصخرية أو أي طبقة أخرى غير منفذة . يحكم العرض السفلي للخندق بالفراغ المطلوب بتره من الأساس ونوع الآليات المستخدمة في الانشاء . وأقل عرض عادة ما يؤخذ ٥ متر .

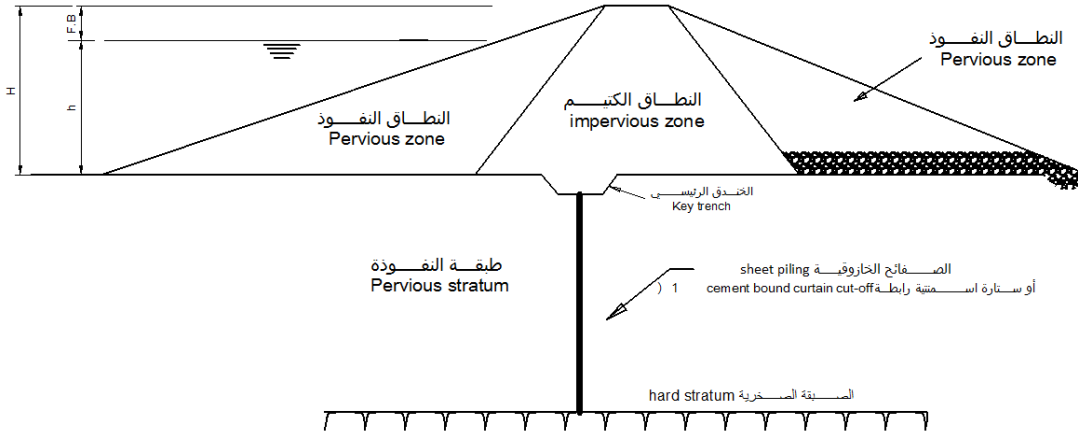


الشكل (١٥-٤) معالجة الأساس السطحي (الضحل) النفوذ shallow pervious foundation

هناك طرق أخرى لخندق منع الرش قد تكون أكثر اقتصادية مثل خنادق منع الرش العميقة Deep cut of trenches . والقيمة العظمى لعرق الخندق محكومة بالاعتبارات الاقتصادية . والعمق الكافي للخندق هو عمق الطبقة المنفذة أي إلى نهاية الطبقة المنفذة في الأساس و بداية الطبقة الصلبة .

قد يكون البتر cut off :

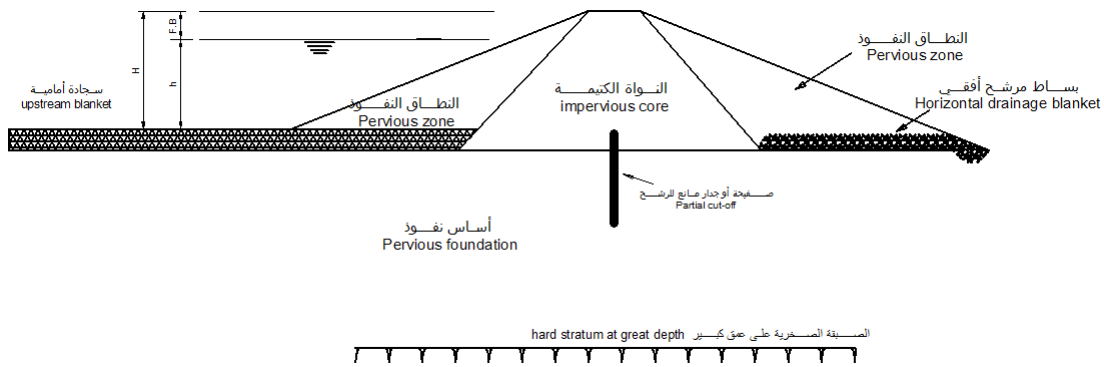
- (١) ستارة خازوقية sheet pile
  - (٢) ستارة اسمنتية رابطة cement bound curtain
  - (٣) جدار أو صفيحة خرسانية concrete diaphragm
- الشكل (١٦-٤) يوضح ذلك



الشكل (١٦-٤) معالجة الأساس متوسط النفاذية Treatment moderate pervious foundation

٤-٥-٣ جدار صفائحي أو أي جدار آخر مانع للرشح partial cut-off

عندما تكون الطبقة العليا للأساس منتظمة وعميقة و منفذة uniform deep pervious strata فإن دور البتر الجزئي partial cut-off فب تقليل السريان محدود جداً seepage. إن البتر الذي يصل إلى 80% من العمق الكلي للطبقة المنفذة يقلل من السريان بنسبة 50% فقط . لذلك فإن الحل المناسب لطبقة الأساس العميقة و المنفذة عندما يكون تزويدها بالبتر الكامل positive cut off غير ممكن اقتصادياً هو ، البتر الجزئي partial cut-off ، مع بساط المقدمة upstream blanket ، وهو حل مناسب لتقليل سريان المياه وضغط الرشح seepage pressure (الشكل (١٧-٤)).



الشكل (١٧-٤) معالجة الأساس النفاذ العميق Treatment for deep pervious foundation

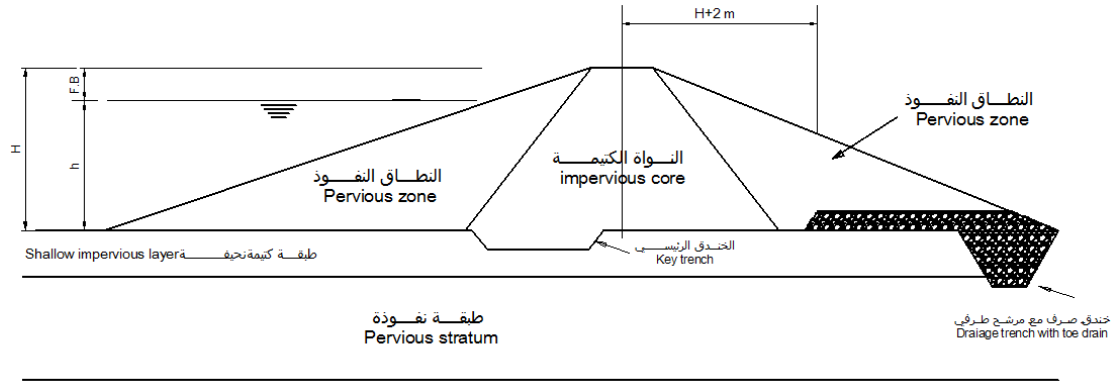
٤-٥-٤ الصفائح الخازوقية sheet piling cut-off

يمكن استخدام الصفائح الخازوقية الفولاذية steel cut-off sheet piling في الأساسات السلتية silty و الرملية sandy و الحصى الناعم fine gravel. إذا كانت طبقة الأساس تحتوي على أحجار كبيرة boulders سيكون من

الصعب دق الصفائح الخازوقية فيها . و في هذه الحالة عمل صفائح حجز المياه سيكون في غاية الصعوبة . هناك أخطاء تحدث دائماً وهي التسرب عبر المفاصل بين الصفائح و عبر اتصالها مع صخر الأساس (الشكل (١٦-٤)).

#### ٥-٢-٥-٤ خنادق الصرف drainage trenches

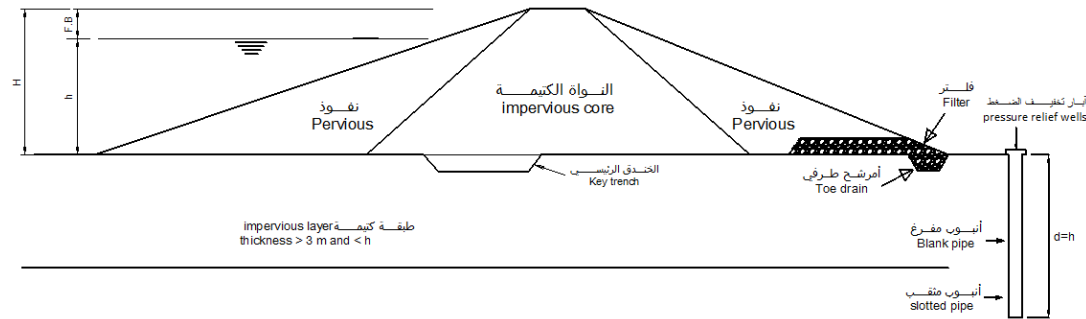
يمكن أن تستخدم ن خنادق الصرف drainage trenches للتحكم بالرشح seepage إذا كانت الطبقة العليا للأساس كتيمة ورقيقة *impervious stratum is thin* وتحتها طبقة منفذة قليلة السماكة (سطحية) *pervious foundation is shallow* ، لهذا يمكن عمل خندق يخترق الطبقة السطحية العليا الكتيمة كما في الشكل (١٨-٤) . وعندما تكون طبقة الأساس المنفذة عميقة *pervious foundation is deep* ، فإن عمل خندق الصرف drainage trench إلى أي عمق معقول يجذب جزء صغير فقط من الرشح ، فتأثير خندق الصرف سيكون موضعياً لأن الرشح أسفل الطبقة سيتجاوز الخندق .



الشكل (١٨-٤) معالجة الطبقة النحيفة النفوذة Treatment for shallow impervious layer

#### ٦-٢-٥-٤ آبار تخفيف الضغط pressure relief wells

إن الغرض الرئيسي من آبار تخفيف الضغط pressure relief wells هو تخفيف ضغوط الرفع uplift pressures والتي تسبب بطريقة أخرى تشكلات فقايع الرمل sand boils والتآنب piping . أيضاً آبار تخفيف الضغط pressure relief wells تعترض الرشح و تجعل مخارجة outlets for seepage مسيطر عليها و من دون ذلك ستكون مؤخرة السد غير آمنة ضد الرشح uncontrolled downstream of the dam . نظرياً، يحدث التآنب عندما يكون ضغط الرفع uplift pressure عند نقطة في أي مستوى في الأساس قرب مؤخرة السد downstream أكبر من مجموع الوزن للتربة والماء فوقها . هذا إذا كان سمك الطبقة العليا الغير منفذة أقل من ارتفاع الضاغط من ماء الخزان  $h$  . و لكن إذا كانت سمكية جداً من أن تعالج بخنادق الصرف drainage trenches أو إذا كان الأساس النفاذ على شكل طبقات ، فإن ذلك يتطلب عمل آبار تخفيف الضغط pressure relief wells .

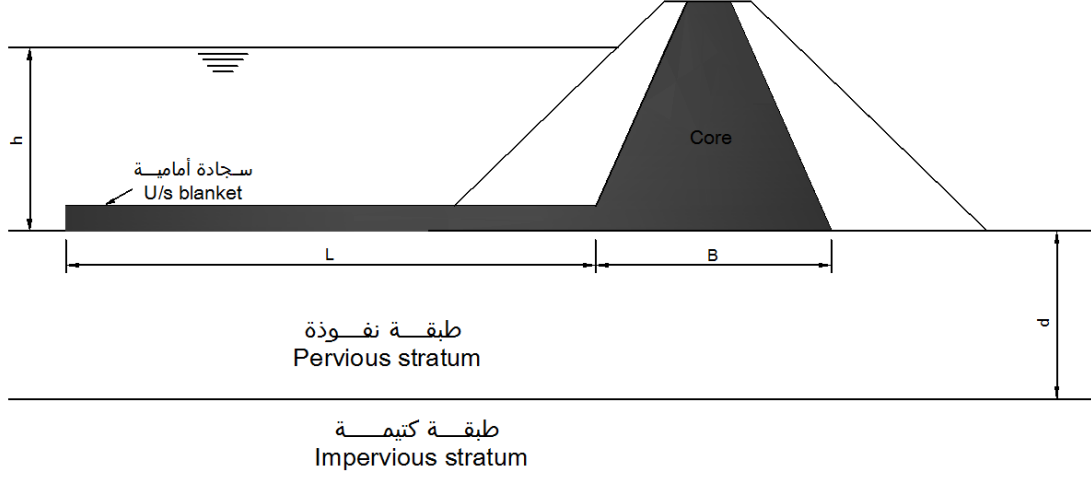


الشكل (١٩-٤) معالجة الطبقة التي فوقها طبقة كتيمة (سمكتها أكبر من ٣ متر و أقل من  $h$ )

Treatment for overlying impervious layer

#### ٧-٢-٥-٤ السجادة الأمامية الكتيمية upstream blanket

يوضع بساط من الطين الكتيم impervious clay blanket في مقدمة السد ويمتد إلى النواة الكتيمية في مقطع السد الشكل (٢٠-٤) وهي طريقة مناسبة تؤدي إلى تهدئة وتقليل كمية السريان seepage .



الشكل (٢٠-٤) السجادة الأمامية الكتيمية upstream blanket

يعطى طول البساط blanket بالمعادلة التالية :

$$L = \frac{Khd - pqB}{pq} \quad (4.7)$$

حيث :

L طول السجادة الأمامية الكتيمية upstream blanket (m)

K معامل النفاذية الأفقي للطبقة المنفذة (m/s)

h ارتفاع الضاغظ فوق السجادة الأمامية الكتيمية upstream blanket (m)

d عمق الطبقة المنفذة (m)

p نسبة من التصريف تحت السد في حالة عدم وجود البساط blanket والتي يراد تقليل السريان seepage حتى الوصول إليها . مثلاً إذا كان المطلوب تقليل كمية السريان إلى النسبة 25% من كمية السريان في حالة عدم وجود البساط blanket (السجادة) فإن قيمة هي (p=0.25)

B طول الجزء الكتيم من قاعدة السد (m)

q كمية تدفق السريان تحت السد ، في حالة عدم وجود البساط blanket (السجادة) ، و q هي لكل متر طولي في البعد الثالث من السد وتساوي

$$q = K \left( \frac{h}{B} \right) d$$

و سماكة البساط blanket (t) تعتمد على نفاذية مادة البساط ، ونفاذية مادة الأساس وعمقه . وفي الحالات الاعتيادية Normal condition تؤخذ السجادة الأمامية الكتيمية upstream blanket بين 1.5 m إلى 3 m والطول (L) بحدود عشرة أضعاف الضاغظ المائي head of water .



#### ٦-٤ حماية ميول مقطع السد Embankment Slope Protection

##### ١-٦-٤ حماية ميل مقدمة السد Upstream slope protection

يجب حماية ميل مقدمة السدود الترابية-الترابية (المشييدة من مواد ترابية فقط) earthfill dams ضد فعل الأمواج التي تضر بمقدمة السد . والنوع المعتاد لحماية سطح ميل المقدمة هو الغطاء الحجري stone rip-rap أما ، أحجار تلقى بشكل عشوائي dry-dumped rip-rap الشكل (٢١-٤) ، أو ترص بشكل متناسق hand placed الشكل (٢٢-٤) ، والتبطين بالخرسانة concrete pavement . عند استخدام طبقة قليلة السمك من الأحجار ، فإن رصها اليدوي قد يكون أكثر اقتصادية من ألقائها بشكل عشوائي . إن طبقات الفلتر تكون دائماً مطلوبة تحت الحماية الحجرية rip-rap لصد الأمواج ومنعها من حت وتعرية جسم السد Embankment تحت الحماية الحجرية . إن سمك طبقة الحجر وقطر حبيبات الفلتر المستخدمة ، والذي يمكن اعتماده لحماية مقدمة السد مبين في الجدول (٢-٤) حسب ارتفاع جسم السد Embankment .

ارتفاع جسم السد Embankment height	حماية مقدمة السد Upstream protection
ما دون 5 متر	بدون حماية
ما بين 5 متر و 10 متر	0.25 متر أحجار توضع فوق 0.15
ما فوق 10 متر و قل من 15 متر	0.30 متر أحجار توضع فوق 0.15 متر حصي متدرج
ما فوق 15 متر و قل من 25 متر	0.50 متر أحجار توضع فوق 0.25 متر حصي متدرج
ما فوق 25 متر و قل من 50 متر	0.50 متر أحجار توضع فوق 0.3 متر حصي متدرج
ما فوق 50 متر و قل من 75 متر	0.75 متر أحجار توضع فوق 0.5 متر حصي متدرج
ما فوق 75 متر	1.0 متر أحجار توضع فوق 0.75 متر حصي متدرج



الشكل (٢١-٤) حماية حجرية ملقاه بشكل عشوائي على مقدمة السد Dumped rock riprap



الشكل (٢٢-٤) حماية حجرية رص يدوي hand placed rock riprap

#### Downstream slope protection حماية ميل المؤخرة

إن مشكلة النحر في ميول مؤخرة السد بفعل الجريان السطحي الناتج عن سقوط الأمطار بكميات كبيرة ومباشرة فوق وجه مؤخرة السد ، يمكن تجنبه عن طريق ملئ الأخاديد المتكونة ما بين وقت وآخر أو عن طرق زراعة غطاء نباتي مناسب على ميل المؤخرة. كذلك إن في بعض المساحات قليلة طيلة فصول السنة سيكون عليها غطاء نباتي مناسب لحماية ميل المؤخرة ، وكذلك عمل تدرجات ذات عرض مناسب وبارتفاعات مناسبة ، وكذلك قد تستخدم طرق أخرى لحماية ميل المؤخرة من النحر منها ، التغطية بالأحجار dumped rip-rap (كالمستخدمة في حماية ميل المقدمة Upstream slope protection ) ، والتي يمكن استخدامها لحماية ميل المؤخرة بشكل جيد .

#### ٧-٤ اختيار نوع السد الترابي Selection of Type of Earth Dam

يحدد نوع السد الترابي بسهولة ، وذلك اعتماداً على المواد المتوفرة في موقع السد أو بالقرب منه ، وكذلك نوع طبقة التأسيس تحت السد .

تصنف السدود الترابية إلى ثلاثة أنواع رئيسية :

١. النوع المتجانس Homogeneous type
٢. النوع النطقي Zoned type
٣. النوع ذو الجدار أو الصفيحة الحاجزة Diaphragm type

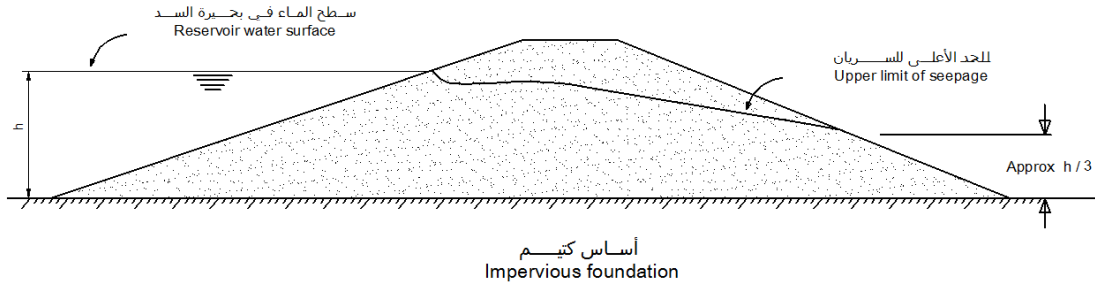
#### ١-٧-٤ النوع المتجانس Homogeneous type

السد الترابي المتجانس تماماً purely homogeneous earth dam يتكون من نوع واحد من المواد

كالذي في الشكل (٢٣-٤) . يجب أن يكون ميل مقدمة السد Upstream slope لهذا النوع منبسطة flat نسبياً لتكون آمنة ضد الانزلاق المفاجئ rapid drawdown ، وكذلك ميل المؤخرة downstream slope يجب أن يكون منبسط flat حتى الوصول إلى ميل مستقر بشكل كافٍ لمقاومة القوى الناتجة عن مستوى التشبع الأعلى high saturation level . هذا النوع من السدود الترابية يكون مناسب في حالة كون الميول المنبسطة flat مطلوبة ، لأن الأساس ضعيف weak foundation

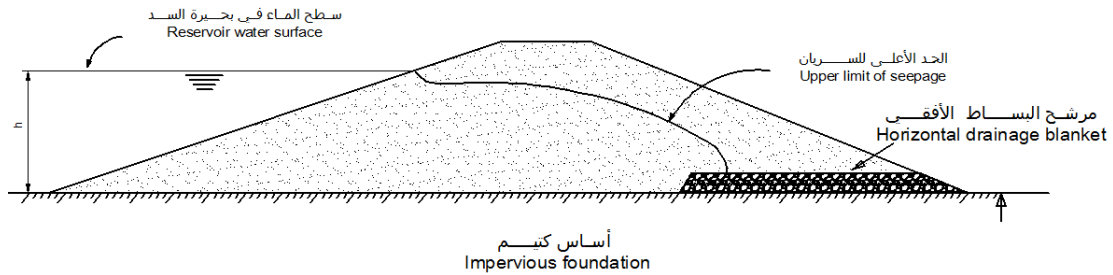
السد الترابي المتجانس تماماً purely homogeneous earth dam يدعى بالسد الترابي المعدل modified homogeneous dam ، عند إضافة مرشح داخلي internal drainage بشكل مناسب في جسم السد Embankment ، منها ، مرشح البساط الأفقي horizontal drainage blanket الشكل (٢٤-٤) ، المرشح الطرفي rock toe الشكل (٢٤-٤) ب) ، المرشح المائل chimney drain الشكل (٢٤-٤) ج) . الغرض من نظام المرشح drainage system هو التحكم بفعل السريان seepage ، وكذلك يسمح باستخدام ميول أكثر حدة much steeper slopes .

السد من النوع المتجانس يكون مستحسن فقط عند عدم توفر المواد المرشحة free-draining (أو أن توفيرها غير اقتصادي) ، وذلك لإنشاء جسم السد Embankment من هذه المواد المرشحة وأخرى كثيفة (سد مركب من نواه كثيفة وميول نفوذة) . إن اقتراح المصرف (المرشح) الأنسب للسدود الترابية المتجانسة المعدلة موضح بالشكل (٢٤-٤) .

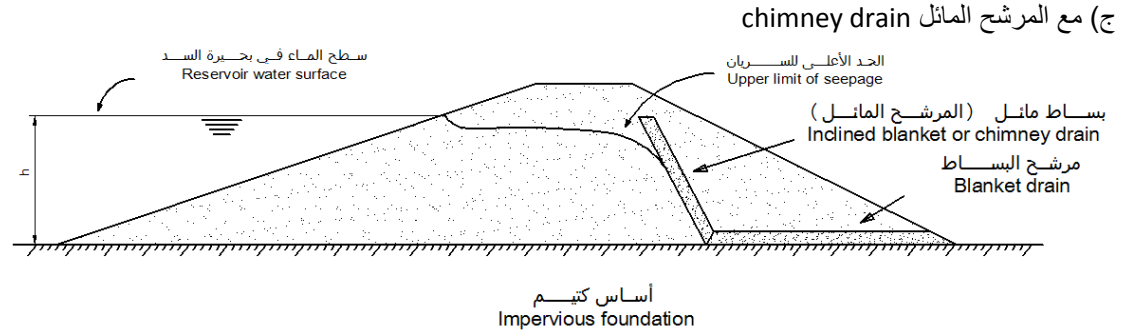
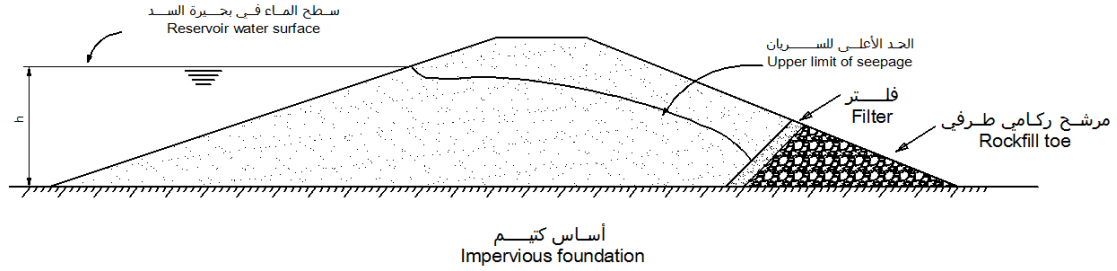


الشكل (٢٣-٤) السريان عبر السد المتجانس تماماً Seepage through a purely homogeneous dam

#### أ) مع مرشح البساط الأفقي horizontal drainage blanket



#### ب) مع مرشح طرفي rockfill toe



الشكل (٢٤-٤) السريان seepage عبر السد الترابي المتجانس المعدل modified homogeneous earth dam

#### ٢-٧-٤ النوع النطقي Zoned type

إن جسم السد Embankment النطقي يتكون من نواة مركزية كثيفة على شكل طبقة رأسية أو مائلة تستند على مواد ترابية أو ركامية ذات نفاذية عالية considerably more pervious. إن جسم السد Embankment من هذا النوع دوماً يشيد عندما يكون هناك أنواع مختلفة من التربة يمكن الحصول عليها بسهولة (متوفرة في الموقع أو بالقرب منه) ولأن ذلك سيؤدي إلى توفير في كلفة الأنشاء. هناك ثلاث فوائد رئيسية لاستعمال مقطع السد النطقي :

١. يمكن استخدام ميول أكثر حدة والت تؤدي إلى تقليل حجم مواد جسم السد Embankment.
٢. قد تستخدم مواد ذات تباين كبير في خصائصها.
٣. إمكانية الاستخدام الأقصى للمواد الترابية لإنشاء جسم السد Embankment من التربة الناتجة عن فر الأساس ، والمفيض ، ومشغلات المخارج ، والمنشآت الملحقة الأخرى .

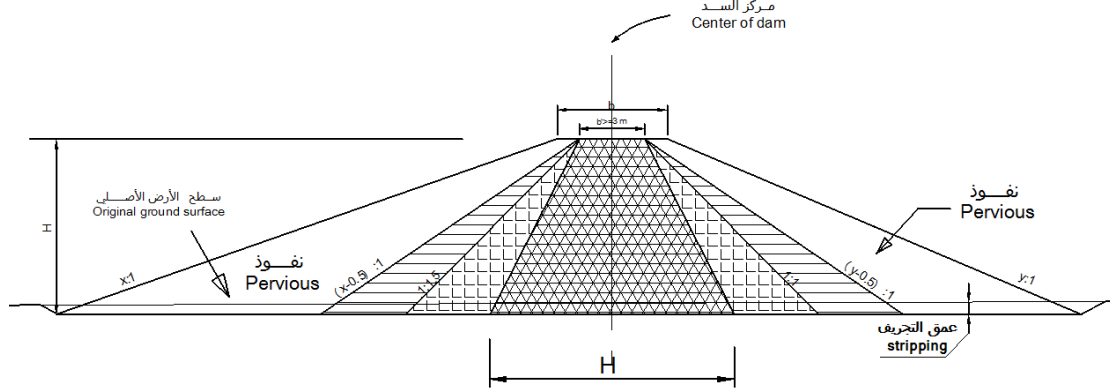
إن أقل عرض للنواة يجب أن يكون كافي ، لتقليل السريان ، وسهل التنفيذ . الحجم المقترح للقيمة الأصغر للنواة مبين في الشكل (٢٥-٤) للحالتين التاليتين .

١. القيمة الأصغر للنواة في الحالة A ، للسدود التي هي على أساس كتيم أو طبقة الأساس نفاذة ولكن ذات سماكة صغيرة يمكن قطعها بخندق مانع للرشح وصولاً إلى الطبقة الكثيفة .
٢. القيمة الأصغر للنواة في الحالة B ، للسدود التي هي على أساس نفاذ وبدون خندق مانع للرشح يصل إلى الطبقة الكثيفة .

القيم الاعظمية للنواة الكثيفة التي تمثل الحد الأعلى الذي يمكن اعتبار السد بأنه يعمل كسد نطاقي مبينة أيضاً في الشكل (٢٥-٤) .

إذا كانت النواة أصغر من القيمة الأصغر (A) ، سيعتبر السد من النوع ذو الجدار أو الصفيحة الحاجزة Diaphragm type ، وإذا كانت النواة أكبر من القيمة الأعظمية المبينة في الشكل (٢٥-٤) ، فإن النطاق النفاذ في أغلب الأحيان غير مجدي في استقرار النواة ، ويمكن اعتبار جسم السد Embankment من النوع المتجانس .

كل الانتقالات بين حدود المواد المختلفة في التدرج الحبيبي و المعرضة للرشح يجب أن تؤمن بفلتر يمنع حركة حبيبات التربة ، لضمان عدم حدوث التآكل لمواد النطاق الواحد من الفراغات في النطاقات المجاورة ، إما في الحالة المستقرة أو في حالة قوى الرشح الناتجة عن الانخفاض المفاجئ لمنسوب المياه في بحيرة السد drawdown seepage forces . إذا كان هناك انتقال بالتدرج بين حدود النطاقات في السد وهذا هو عمل الفلتر الطبيعي في حالة عدم الاستقرار بين النطاقات ، فإن نطاق الفلتر مطلوب لتوفير الحاجز المناسب لحبيبات التربة .



الشكل (٢٥-٤): مديات الحجم للنواة الكتيمة في جسم السد النطاقي embankment Size range of impervious cores in zoned

#### ٣-٧-٤ النوع ذو الجدار أو الصفيحة الحاجزة Diaphragm type

يتكون السد ذو الجدار أو الصفيحة الحاجزة Diaphragm type من حاجز مياه رقيق وكتيم لحجز تسرب المياه عبر جسم السد المنشأ من مواد نفوذة . يمكن أن تنشأ الصفيحة الحاجزة من مواد ترابية ، أو خرسانة ، أو مواد أخرى . يستخدم السد من هذا النوع عموماً عند توفر المادة ذات الكثافة العالية .

#### ٨-٤ السريان عبر السدود الترابية seepage through earth dams

هناك العديد من الحلول المتوفرة لإيجاد كمية السريان و السطح الحر خلال السدود الترابية المتجانسة الواقعة فوق قاعدة كتيمة . من هذه الحلول طريقة دوبويت Dupuit ذات الفرضيات التالية :

١. في الميول الصغيرة يمكن أخذ (افتراض) خط التسرب أفقي (إن فخطوط الجهد تقرب إلى الخطوط العمودية)
٢. الانحدار الهيدروليكي hydraulic gradient يساوي ميل السطح الحر ، وثابت مع العمق .

#### ١-٨-٤ حل دوبويت Dupuit's solution

من فرضيات دوبويت Dupuit ، التصريف (السريان) لكل وحدة طول في أي مقطع رأسي (y) من السد كالمبين في الشكل (٢٦-٤) يمكن إيجاده من المعادلة :

$$q = K \times i \times A \quad (4.8)$$

$$q = K \times \frac{dy}{dx} \times y \times 1 \quad (4.9)$$



بإعادة ترتيب المعادلة

$$\frac{q}{K} dx = dy \times y \quad (4.10)$$

بإجراء التكامل على طرفي المعادلة (4.10)

$$y^2 = \frac{2qx}{K} + C \quad (4.11)$$

حيث أن (C) هو ثابت التكامل . باستخدام حالات الحدود الطرفية (الشروط الطرفية) استناداً إلى الشكل (٢٦-٤)

$$\text{at } x = 0 \quad y = h_2 \quad \dots \dots \dots 1$$

$$\text{at } x = L \quad y = h_1 \quad \dots \dots \dots 2$$

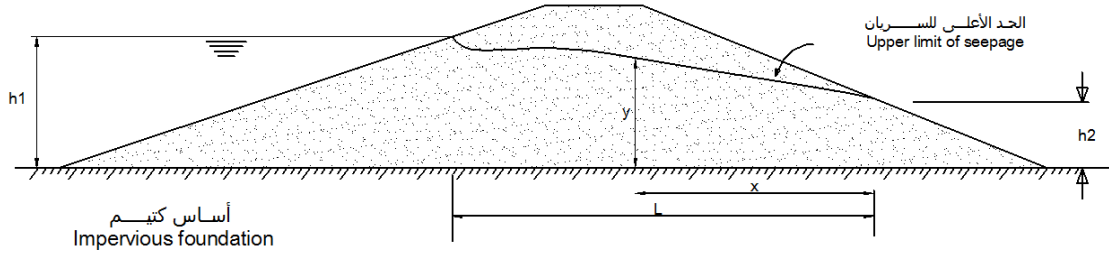
باستخدام الشرط الطرفي (1) ، فإن قيمة C تساوي  $h_2^2$  :

$$y^2 = \frac{2qx}{K} + h_2^2$$

ومن الشرط (2) نحصل على قيمة (x)

$$h_1^2 = \frac{2qx}{K} + h_2^2$$

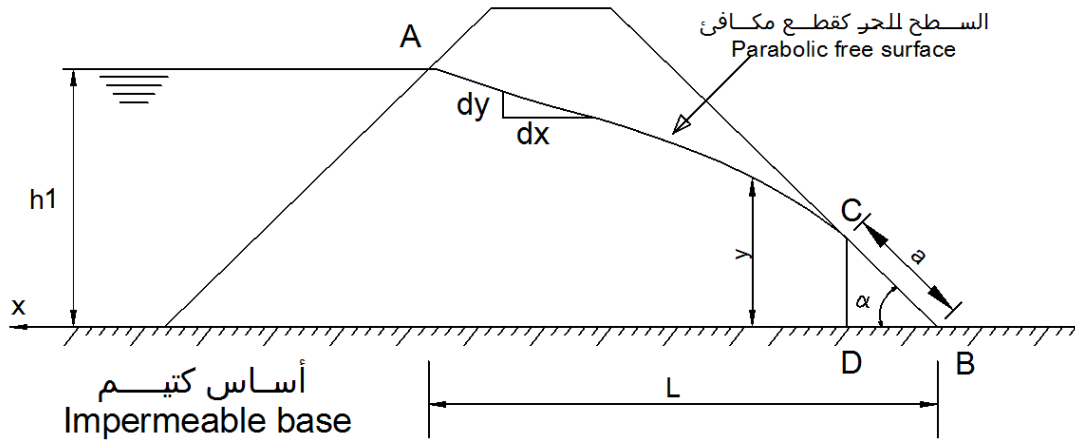
$$q = \frac{K(h_1^2 - h_2^2)}{2L} \quad (4.12)$$



الشكل (٢٦-٤): السريان عبر السدود الترابية المتجانسة

٢-٨-٤ حل سكافرنيك وإترسون Schaffernak and Iterson's solution (صحيح عند  $(\alpha < 30^\circ)$ )

حل سكافرنيك وإترسون Schaffernak and Iterson's solution يعطي بدائي حالة خروج خطوط السريان أعتبر أن خط السريان seepage line يقطع وجه التصريف discharge face عند ميل المؤخرة والذي يساوي القيمة a الشكل (٢٧-٤) .



الشكل (٤-٢٧): حل سكافرنيك وإترسون Schaffernak and Iterson's solution عند  $\alpha < 30^\circ$

أستخدم افتراض دوبويت الثاني (الذي يعني الانحدار الهيدروليكي يساوي ميل خط السريان line of seepage) لذلك ، فإن الحل صحيح إذا كان السطح الأعلى للسريان phreatic line منبسط نسبياً . كمية التصريف q عبر أي مقطع رأسي من السد يمكن أن يعبر عنها كالتالي :

$$q = K \times \frac{dy}{dx} \times y \quad (4.13)$$

الجريان الحاصل عبر السطح الرأسي CD هو :

$$q = K \times CD \times \tan \alpha \quad (4.14)$$

$$q = K \times (a \sin \alpha) \times (\tan \alpha) \quad (4.15)$$

بمساواة المعادلتين (4.13) و (4.15) نحصل على :

$$K \times y \times \frac{dy}{dx} = K \times (a \sin \alpha) \times (\tan \alpha) \quad (4.16)$$

من حالات الحدود (الشروط الطرفية )

$$y = h \quad \text{for} \quad x = L$$

$$y = a \sin \alpha \quad \text{for} \quad x = a \cos \alpha$$

يجرى التكامل على المعادلة (4.16) كالتالي :

$$\int_{a \sin \alpha}^h y \times dy = (a \sin \alpha) \times (\tan \alpha) \times \int_{a \cos \alpha}^L dx$$

$$\left(\frac{y^2}{2}\right) \Big|_{a \sin \alpha}^h = (a \sin \alpha) \times (\tan \alpha) \times (x) \Big|_{a \cos \alpha}^L$$

$$(h^2 - a^2 \sin^2 \alpha) = 2 \times (a \sin \alpha) \times (\tan \alpha) \times (L - a \cos \alpha)$$

$$h^2 - a^2 \sin^2 \alpha - 2 a \sin \alpha \times \frac{\sin \alpha}{\cos \alpha} \times (L - a \cos \alpha) = 0$$

$$h^2 - a^2 \sin^2 \alpha - 2a \times L \times \frac{\sin^2 \alpha}{\cos \alpha} + 2a^2 \sin^2 \alpha = 0$$

$$a^2 - 2L \times \frac{1}{\cos \alpha} a + \frac{h^2}{\sin^2 \alpha} = 0$$
 وهذه معادلة من الدرجة الثاني تحل بالقانون العام

$$a = \frac{1}{2} \left[ -\frac{-2L}{\cos \alpha} - \sqrt{\frac{4L^2}{\cos^2 \alpha} - \frac{4h^2}{\sin^2 \alpha}} \right]$$

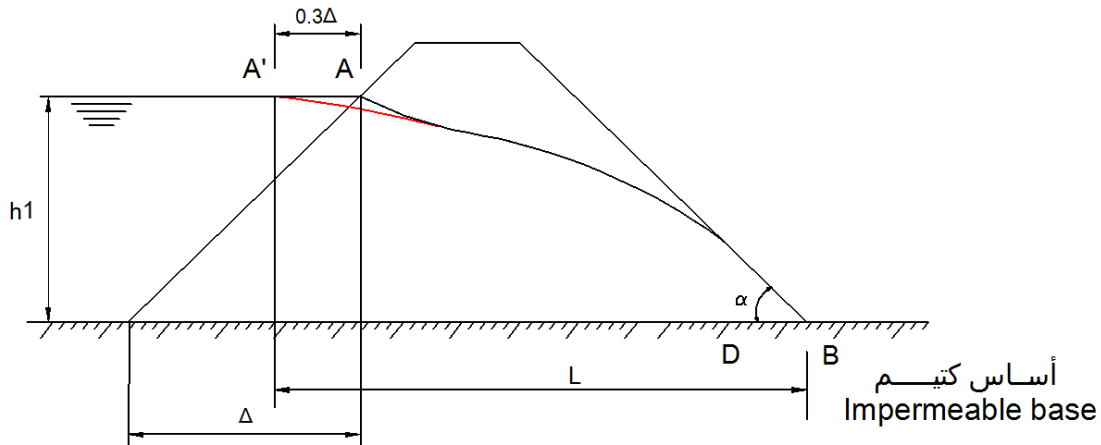
$$a = \frac{L}{\cos \alpha} - \sqrt{\frac{L^2}{\cos^2 \alpha} - \frac{h^2}{\sin^2 \alpha}} \quad (4.17)$$

وهي التعبير الذي نحصل منه على طول وجه التصريف (a) على مؤخرة السد .

وبإيجاد (a) من المعادلة (4.17) يمكن تخمين السريان عبر جسم السد باستخدام المعادلة (4.15)

$$q = K \times (a \sin \alpha) \times (\tan \alpha) \quad \text{وهي:}$$

بالرغم من أن الحل يعطي حالة المخرج لخط السريان seepage line على شكل قيمة ، فإن حالة الحدود عند المدخل هي تصحيح إضافي مطلوب . وقد أقترح كازاجراندي Casagrande أن بداية الخط النظري للسريان يجب أن تزاح إلى النقطة A' (الشكل (٢٨-٤)) وهذه الإزاحة يمكن جعلها مساوية لـ  $(AA' = 0.3\Delta)$  حيث  $\Delta$  موضحة بالشكل (٢٨-٤) . هذا الحل يصبح غير دقيق عندما تكون الزاوية  $(\alpha)$  أكبر من  $30^\circ$  .



الشكل (٢٨-٤): تصحيح كازاجراندي لأصل خط السريان origin of the line of seepage

مثال (١-٤)

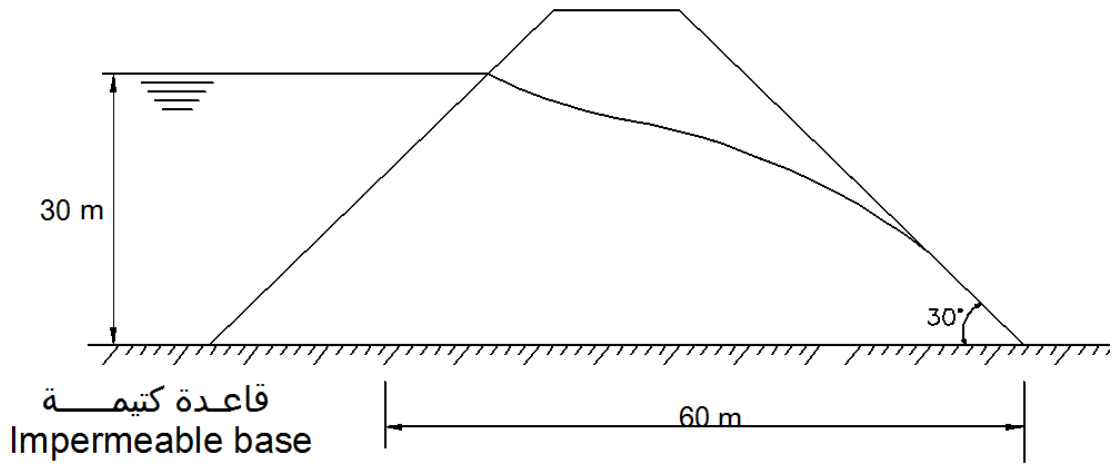
أوجد كمية السريان عبر المقطع العرضي للسد الترابي المبين في الشكل (٢٩-٤) . افرض أن معامل النفاذية

$$(K = 1 \times 10^{-4} \text{ cm/s}) \text{ ، ولا يوجد ماء ذيلي No tail water . استخدم}$$

(a) طريقة دوبويت Dupuit

(b) طريقة سكافرنيك





الشكل (٢٩-٤)

الحل

(a) طريقة دوبويوت : باستخدام المعادلة (4.12)

$$q = \frac{K(h_1^2 - h_2^2)}{2L} \quad (4.12)$$

$$q = \frac{1 \times 10^{-4} \times 10^{-2} \times (30^2 - 0)}{2 \times 60}$$

$$q = 7.5 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$$

(a) طريقة سكافرنيك : باستخدام المعادلة (4.15)

$$q = K \times (a \sin \alpha) \times (\tan \alpha) \quad (4.15)$$

حيث نحصل على  $a$  باستخدام المعادلة (4.17)

$$a = \frac{L}{\cos \alpha} - \sqrt{\frac{L^2}{\cos^2 \alpha} - \frac{h^2}{\sin^2 \alpha}} \quad (4.17)$$

$$a = \frac{60}{\cos 30} - \sqrt{\frac{60^2}{\cos^2 30} - \frac{30^2}{\sin^2 30}} = 34.64 \text{ m}$$

إذن فالتصريف  $q$

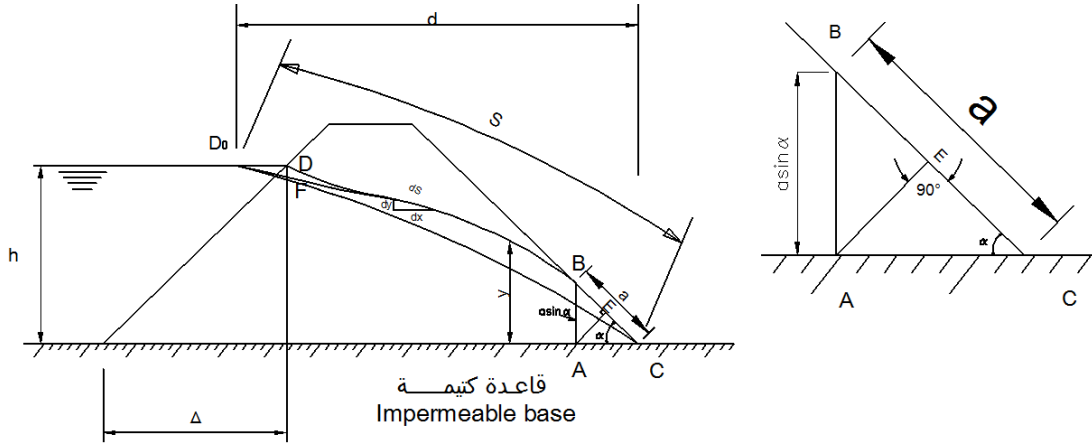
$$q = 1 \times 10^{-4} \times 10^{-2} \times (34.64 \times \sin 30) \times (\tan 30)$$

$$q = 1 \times 10^{-5} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

(لكل متر طولي من السد)

٤-٨-٣ حل كازاجراندي Casagrande's solution (لكل  $\alpha > 30^\circ$ )

قدم كازاجراندي حلول أكثر دقة عندما  $\alpha$  أكبر من  $30^\circ$ . بخلاف الافتراض الثاني لدوبيوت الذي ينص على أن الإنحدار الهيدروليكي مساوي للميل  $\frac{dy}{dx}$  للسطح الحر ، فإن كازاجراندي حل نفس المسألة كغيره من الباحثين ولكن بانحدار هيدروليكي يساوي  $\frac{dy}{ds}$  ، حيث  $s$  هي مقاسة على طول السطح الحر كالمبينة في الشكل (٤-٣٠).



الشكل (٤-٣٠)

كمية التصريف  $q$  عبر أي مقطع رأسي من السد يمكن أن يعبر عنها بالتالي :

$$q = K \times y \times \frac{dy}{ds} \quad (4.18)$$

حيث  $s$  مقاسة على طول خط السريان *seepage line*

بتطبيق المعادلة (4.18) عند المقطع (AB) في الشكل (٤-٣٠) ، ينتج :

$$\begin{aligned} q &= K \times AB \times 1 \times \sin \alpha \\ q &= K \times (a \sin \alpha) \times 1 \times \sin \alpha \\ q &= K \times a \times \sin^2 \alpha \end{aligned} \quad (4.19)$$

بمساواة المعادلتين (4.18) و (4.19) ، ينتج :

$$K \times y \times \frac{dy}{ds} = K \times a \times \sin^2 \alpha \quad (4.20)$$

من الشروط الطرفية

$$\begin{aligned} s &= a & \text{for} & & y &= a \sin \alpha \\ s &= S & \text{for} & & y &= h \end{aligned}$$

حيث  $S$  هي طول المنحنى  $D \rightarrow BC$

تُكامل المعادلة (4.20) كالتالي :

$$\int_{a \sin \alpha}^h y \times dy = (a \sin \alpha) \times (\sin \alpha) \times \int_a^S ds$$

$$\left(\frac{y^2}{2}\right) \Big|_{a \sin \alpha}^h = a \times \sin^2 \alpha \times (s) \Big|_a^S$$

$$(h^2 - a^2 \times \sin^2 \alpha) = 2 a \times \sin^2 \alpha \times (S - a)$$

$$h^2 - a^2 \times \sin^2 \alpha - 2 S \times \sin^2 \alpha \times a - 2 \sin^2 \alpha \times a^2 = 0$$

$$\sin^2 \alpha \times a^2 - 2 S \times \sin^2 \alpha \times a + h^2 = 0$$

$$a^2 - 2 S \times a + \frac{h^2}{\sin^2 \alpha} = 0$$

باستخدام القانون العام لحل المعادلة من الدرجة الثانية ذات متغير واحد :

$$a = \frac{1}{2} \left[ -(-2S) \pm \sqrt{4S^2 - 4 \times \frac{h^2}{\sin^2 \alpha}} \right]$$

$$a = S - \sqrt{S^2 - \frac{h^2}{\sin^2 \alpha}} \quad (4.21)$$

الآن يمكن أن نحصل على التصريف q عبر جسم السد بالتعويض عن قيمة a من المعادلة (4.21) في المعادلة (4.19).

وطبقاً لما جاء به كازاجراندي ، فإن المسافة في المعادلة (4.21) تختلف قليلاً على الخط المستقيم (CΔ°) كما في الشكل (٣٠-٤) ، و الذي قد يستخدم كتقدير أولي . في العموم التقدير الأولي هو كافي .

من الشكل (٣٠-٤) ،

$$S = \sqrt{h^2 + d^2}$$

$$a = \sqrt{h^2 + d^2} - \sqrt{h^2 + d^2 - \frac{h^2}{\sin^2 \alpha}}$$

$$a = \sqrt{h^2 + d^2} - \sqrt{d^2 + h^2 \left( \frac{\sin^2 \alpha - 1}{\sin^2 \alpha} \right)}$$

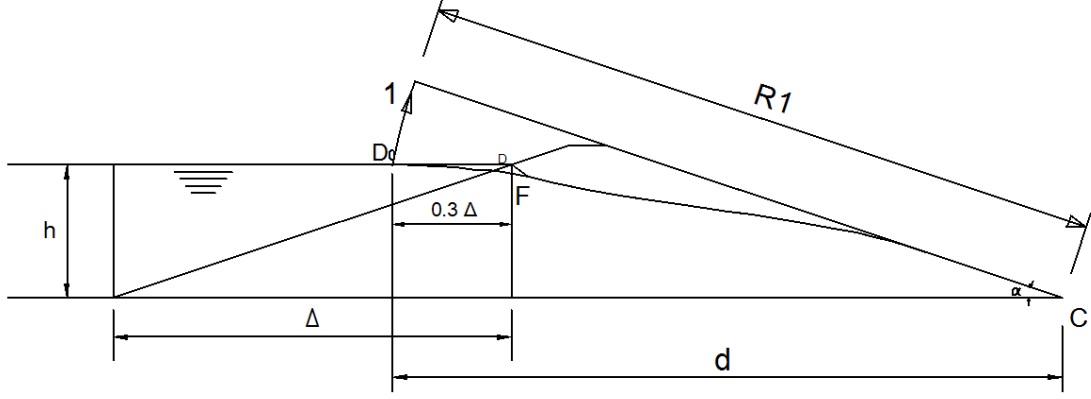
$$a = \sqrt{h^2 + d^2} - \sqrt{d^2 - h^2 \left( \frac{1 - \sin^2 \alpha}{\sin^2 \alpha} \right)}$$

$$a = \sqrt{h^2 + d^2} - \sqrt{d^2 - h^2 \left( \frac{\cos^2 \alpha}{\sin^2 \alpha} \right)}$$

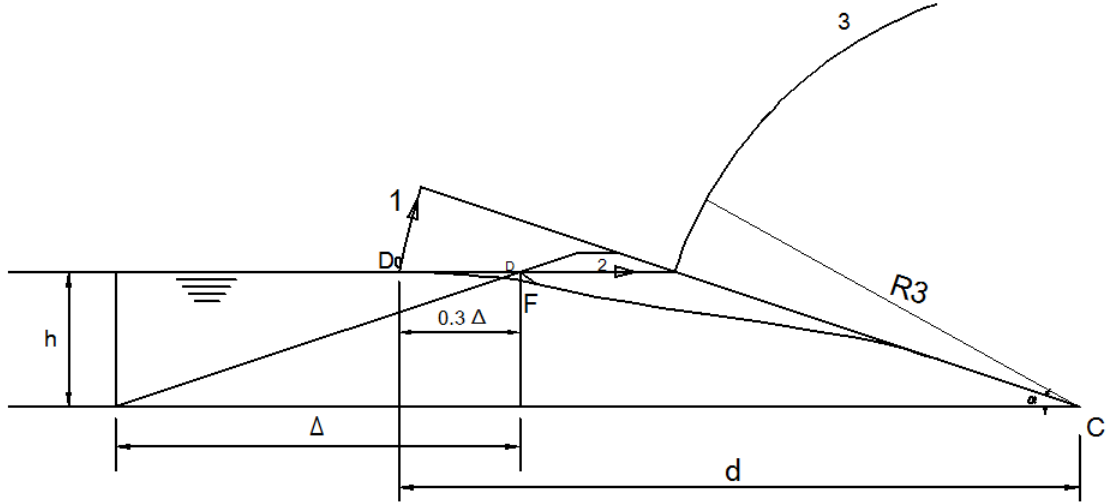
$$a = \sqrt{h^2 + d^2} - \sqrt{d^2 - h^2 \cot^2 \alpha} \quad (4.23)$$

أيضاً أوصى كازجراند بحل بياني للمعادلة (4.23) . هذا الحل يتجنب استخدام تقدير المعادلة (4.23) كالمبين في الشكل (٣٤-٤) .

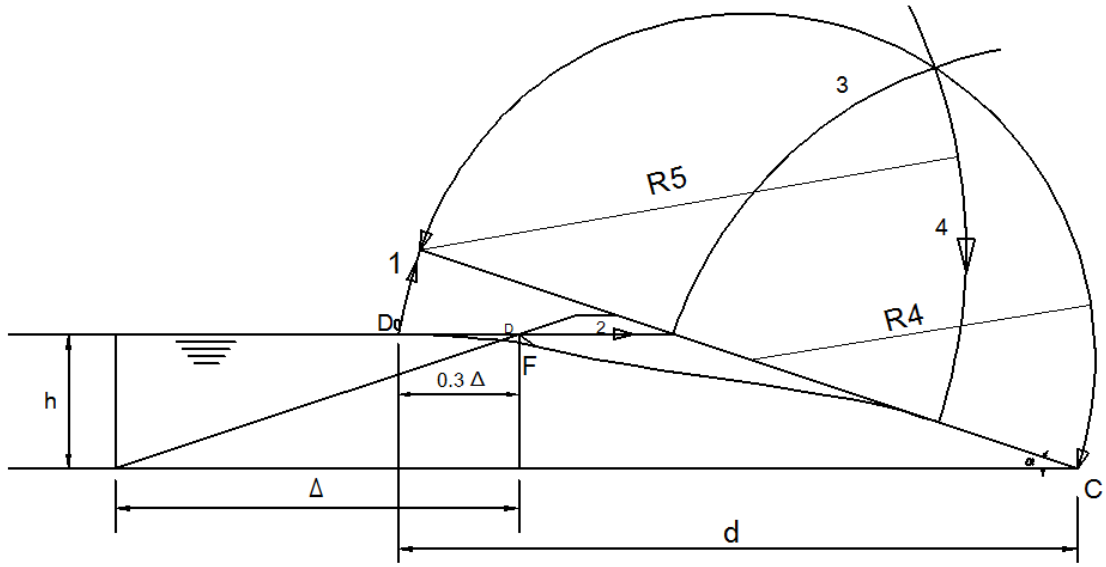
يتم إيجاد قيمة  $a$  (المذكورة سابقاً) من الرسم البياني ، ويمكن إيجاد كمية السريان من المعادلة (4.19) .



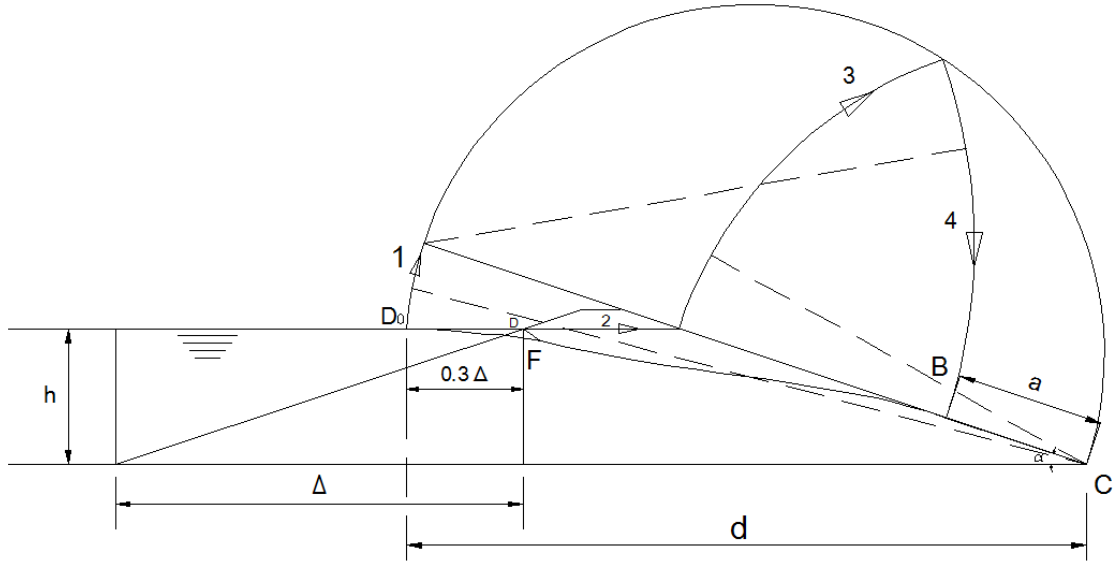
الشكل (٣١-٤): الخطوة الأولى من الرسم



الشكل (٣٢-٤): الخطوة الثانية والثالثة من الرسم



الشكل (٣٣-٤): الخطوة الرابعة من الرسم

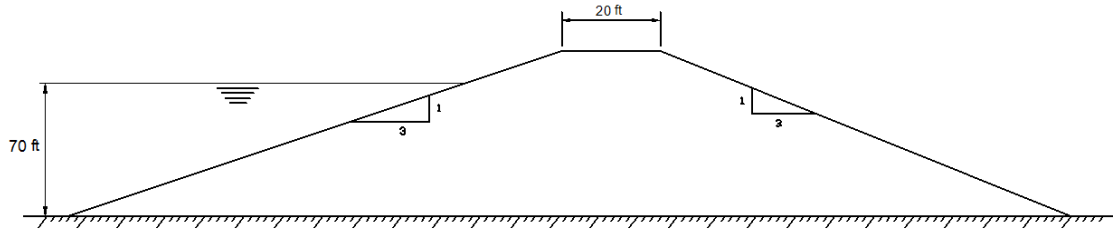


الشكل (٣٤-٤)

من حل كازاجراندا أيضاً نحصل على حل تقديري لحالات سطوح التصريف الواقعة بين  $(90^\circ - 180^\circ)$  . هذه الحلول تستند على حل كوزني Kozeny's solution عند  $\alpha = 180^\circ$  .

مثال (٢-٤)

أوجد كمية السريان لمائة قدم  $(100 \text{ ft})$  من البعد الثالث لمقطع السد المبين في الشكل (٣٥-٤) . معامل النفاذية لمادة السد هي  $(K = 0.002 \text{ ft/min})$  .



الشكل (٣٥-٤)

الحل

من الشكل (٣٦-٤)

$$\alpha = \tan^{-1} \left( \frac{1}{3} \right) = 18.5^\circ$$

$$d = 3H + 20 + 3 \times 10 + 0.2 \times (3 \times h) = 353 \text{ ft}$$

من المعادلة (4.23)

$$a = \sqrt{h^2 + d^2} - \sqrt{d^2 - h^2 \cot^2 \alpha} \quad (4.23)$$

$$a = \sqrt{70^2 + 353^2} - \sqrt{353^2 - 70^2 \cot^2 18.5}$$

$$a = 75.54 \text{ ft}$$

من المعادلة (4.19)

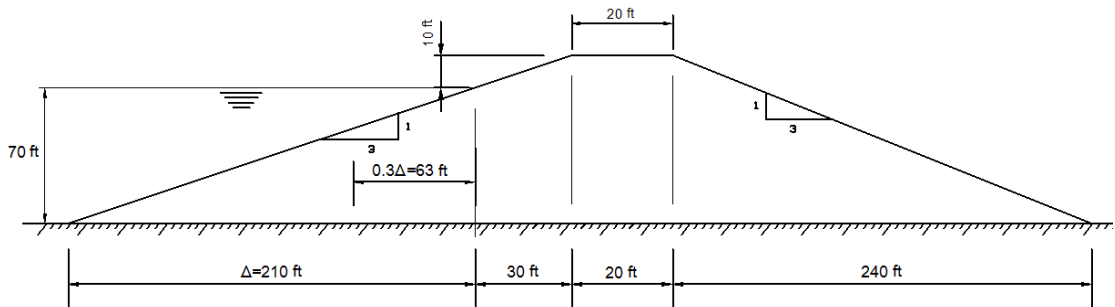
$$q = K \times a \times \sin^2 \alpha \quad (4.19)$$

$$q = 0.002 \times 75.54 \times \sin^2 18.5$$

$$q = 15.21 \times 10^{-3} \text{ ft}^3/\text{min}/\text{ft}$$

كمية السريان لمائة قدم من مقطع السد هي :

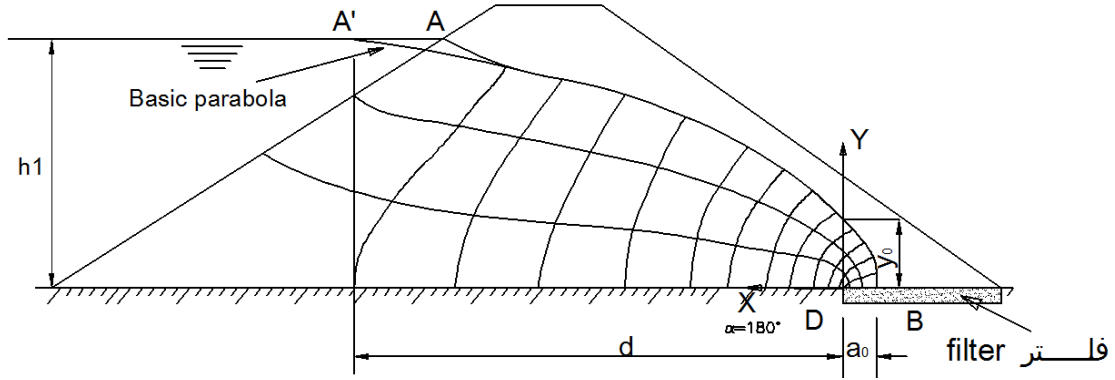
$$Q = 15.21 \times 10^{-3} \times 100 = 1.521 \text{ ft}^3/\text{min}$$



الشكل (٣٦-٤)

#### ٤-٨-٤ حل كوزني Kozeny's solution

عندما يكون ميل وجه التصريف  $(\alpha = 180^\circ)$ . أي أنه يعمل كوجه تصريف أفقي كما في مرشح البساط drainage blanket عموماً ، والذي تزود به مؤخرة السدود الترابية . الحل النظري لكوزني يقترح أن خطوط السريان وخطوط الجهد equipotential المبينة في الشكل (٣٧-٤) يمكن أن تمثل باستخدام فصيلتين من القطوع المكافئة parabolas .



الشكل (٣٧-٤): حل كوزني للتدفق عبر السدود الترابية عند  $(\alpha = 180^\circ)$ .

إن معادلة خط السريان seepage line التي هي معادلة قطع مكافئ ، يعبر عنها كالتالي :

$$q = \frac{y^2 - y_0^2}{2 \times y_0} \quad (4.24)$$

حيث  $x$  و  $y$  هي الإحداثيات المعرفة مع البؤرة O focus (انظر الشكل (٣٧-٤)). قيمة  $y_0$  يمكن إيجادها باستخدام الإحداثيات من نقطة واحدة من النقاط المعلومة الواقعة على خط السريان seepage line في المعادلة (4.24) لهذا فإنه ، عند  $(y=h)$  و  $(x=d)$  ، يمكن أن يعبر عن  $y_0$  كالتالي :

$$y_0 = \sqrt{h^2 + d^2} - d \quad (4.25)$$

من الخصائص الأساسية للقطع المكافئ ، البعد البؤري  $(a_0)$  يمكن أن يحسب كالتالي :

$$a_0 = \frac{y_0}{2} \quad (4.26)$$

كمية التصريف  $q$  خلال أي مقطع رأسي من السد المبينة في الشكل (٣٧-٤) يمكن أن يعبر عنها كالتالي :

$$q = K \times y \times \frac{dy}{dx} \quad (4.27)$$

بإعادة ترتيب المعادلة (4.24) ، فإن قيمة  $y$  يمكن أن يعبر عنها كالتالي :

$$y = \sqrt{2y_0x + y_0^2} \quad (4.28)$$

المشتقة الأولى للمعادلة (4.28) هي :

$$\frac{dy}{dx} = \frac{y_0}{\sqrt{2y_0x + y_0^2}}$$

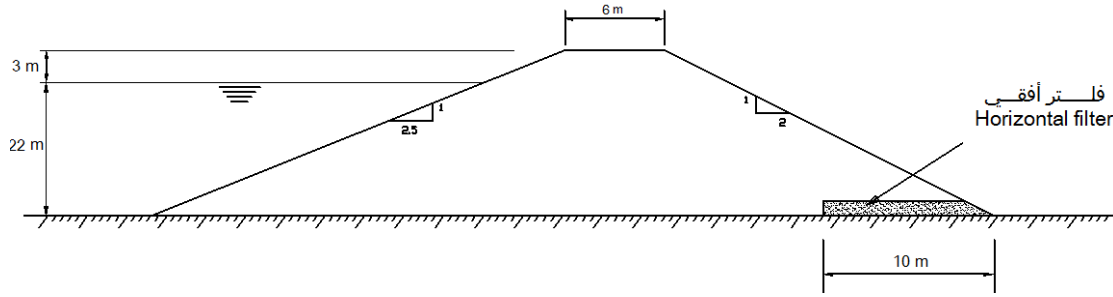
بما أن التصريف المار خلال أي مقطع رأسي هو نفسه ، أو بتعبير آخر ، التصريف ثابت عند أي مقطع رأسي ، إذن عند  $(x = 0)$  ينتج  $(\frac{dy}{dx} = 1)$  و  $(y = y_0)$  .

بالتعويض عن هذه القيمة في المعادلة (4.27) ، يمكن الحصول على كمية السريان  $q$  باستخدام الصيغة التالية :

$$q = K \times y_0 \quad (4.29)$$

مثال (٣-٤)

من مقطع السد المتجانس المبين في الشكل (٣٨-٤) ، ارسم الخط الأعلى للسريان phreatic line إذا كان طول الفلتر الأفقي المزود به السد (10 m) . أيضاً أوجد التصريف لكل متر طولي (البعد الثالث) من السد إذا كان  $K = 10^{-5} \text{ m/sec}$  . استخدم طريقة كوزني .



الشكل (٣٨-٤)

الحل

من الشكل (٣٩-٤)

$$h = 22 \text{ m}$$

$$\Delta = 2.5 \times 22 = 55 \text{ m}$$

$$d = 16.5 + 3 \times 25 + 6 + 25 \times 2 - 10 = 70 \text{ m}$$

باستخدام المعادلة (4.25) يمكن إيجاد قيمة  $y_0$

$$y_0 = \sqrt{h^2 + d^2} - d \quad (4.25)$$

$$y_0 = \sqrt{70^2 + 22^2} - 70$$

$$y_0 = 3.38 \text{ m}$$

بالتعويض بقيمة  $y_0$  في المعادلة (4.28) ، فإن :

$$y = \sqrt{2y_0x + y_0^2} \quad (4.28)$$

$$y = \sqrt{2 \times 3.38 \times x + 3.38^2}$$

$$y = \sqrt{2 \times 3.38 \times x + 11.42}$$

باستخدام المعادلة السابقة ، يمكن رسم خط السريان seepage line . وذلك بإعطاء قيمة للبعد الأفقي ( $x$ ) في المعادلة للحصول على قيمة البعد الرأسى ( $y$ ) .

كمثال عند ( $x=10 \text{ m}$ ) ، ( $y=8.89 \text{ m}$ ) (انظر الشكل (٣٩-٤))

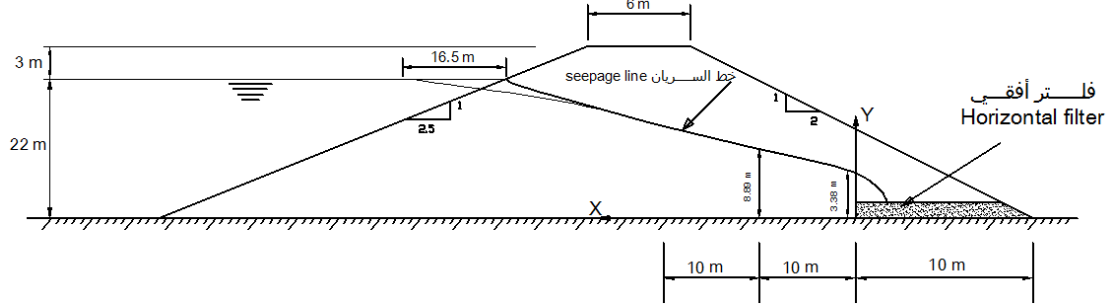
عند ( $x=20 \text{ m}$ ) ، ( $y=12.11 \text{ m}$ ) (انظر الشكل (٣٩-٤))



والجدول (٣-٤) يوضح حسابات إحداثيات خط السريان seepage line

X (m)	0	10	20	30	40	50	60	70
Y (m)	3.38	8.89	12.11	14.64	16.79	18.69	20.42	22.00

الجدول (٣-٤) حسابات إحداثيات خط السريان seepage line



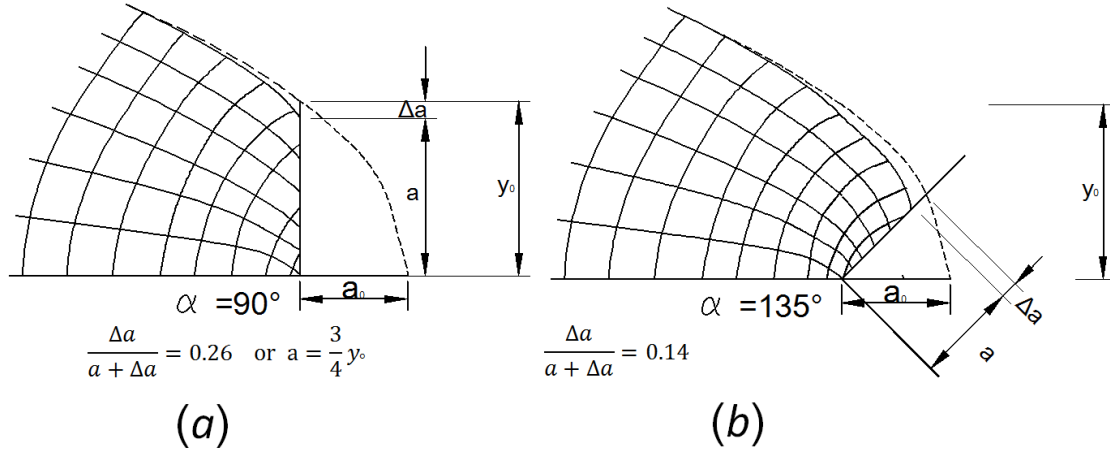
الشكل (٣٩-٤)

يمكن الحصول على التصريف لكل متر طولي من المعادلة (4.29)  $q = K \times y_0$

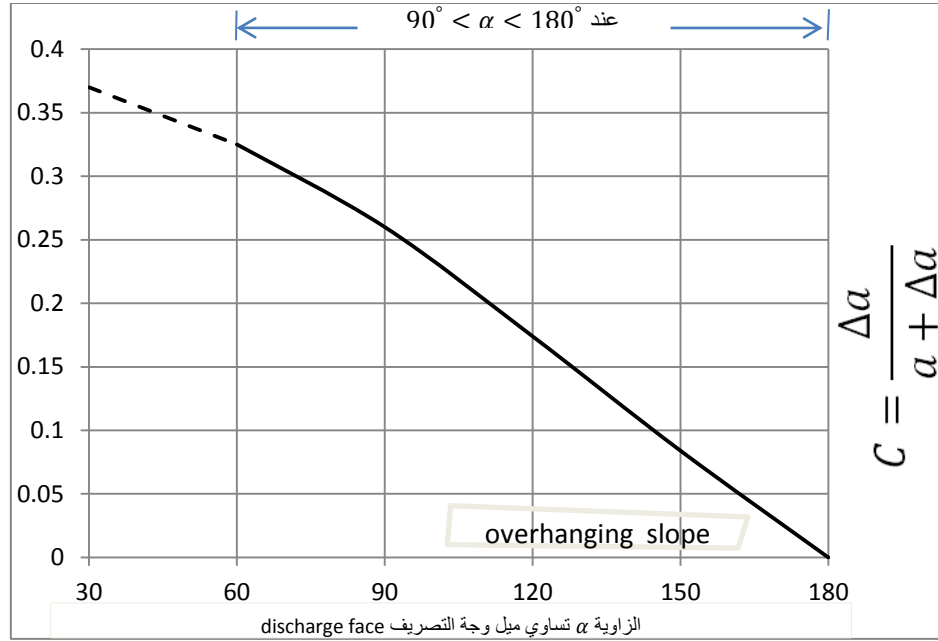
$$q = 3.38 \times 10^{-5} \frac{m^3}{s} / m$$

٤-٨-٥ حل كازاجراندي Casagrande's solution عند  $(90^\circ < \alpha < 180^\circ)$

لسطوح التصريف التي تتأخر  $90^\circ < \alpha < 180^\circ$  ، فإن كازاجراندي قارن بين الحلول من الرسم اليدوي لشبكة التدفق flow net مع حل كوزني عند  $\alpha = 180^\circ$  . كلا المقارنتين مبينة في الشكل (٤٠-٤) (أ) و (ب) عند  $\alpha = 90^\circ$  وعند  $\alpha = 135^\circ$  ، على التوالي . وقد لاحظ كازاجراندي أن طول وجه السريان  $a$  متنسق مع قطع كوزني المكافئ لخط السريان seepage line . الفرق  $\Delta a$  موضح في الشكل (٤٠-٤) و مرسوم بيانياً في الشكل (٤١-٤) ، وقد وجد أن لها تغير منتظم مع  $a$  . العلاقة موضحة في الشكل (٤١-٤) والتي يمكن أن تستخدم لتعديل أصل القطع المكافئ لكوزني والحصول على خط السريان .



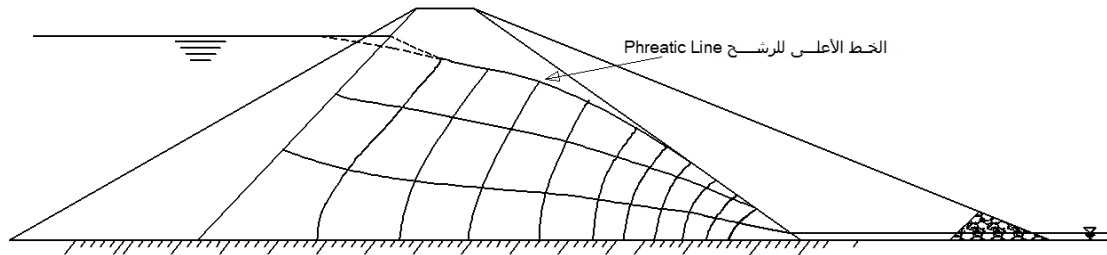
الشكل (٤٠-٤): المقارنة بين شبكات التدفق مع حل كوزني



الشكل (٤١-٤): العلاقة بين  $\Delta a$  والميل  $\alpha$  لوجه التصريف

#### ٤-٨-٦ السريان في السدود الترابية النطقية Seepage in zoned earth dams

إن استخدام النواة الكتيمية في مقطع السد ، يقلل من مية السريان بشكل فعال . مع اللوح النفاذ نسبياً relatively pervious shells ، معظم الهبوط الرأسى vertical drop في خط السريان يحصل في النواة الكتيمية (الشكل (٤٢-٤)). عندما تكون مادة اللوح الخارجي ذات نفاذية بضع مئات أضعاف نفاذية مادة النواة الكتيمية ، فإن لوح مؤخرة السد له تأثير قليل على موقع خطوط السريان .



الشكل (٤٢-٤): السريان في السدود الترابية النطقية Seepage in zoned earth dams

لذلك بالنسبة للسريان ، فإن النواة الكتيمية هي المعتبرة فقط (يمكن إهمال تأثير النطاق النفوذ في السد ) ، ولذا يمكن رسم خطوط السريان عبر النواة الكتيمية فقط. إن مقطع النواة في الشكل (٤٢-٤) أعيد رسمه على طول خط السريان في الشكل (٤٣-٤) . من خصائص القطع المكافئ ، المسافة إلى أي نقطة على القطع من البؤرة  $F$  ، مثل  $FD_0$  ، وهي  $a + \Delta a$  تساوي المسافة من البؤرة إلى المستقيم العمودي على المستقيم الذي يمر بنقطة الرأس  $E$  ونقطة البؤرة  $F$  والمسافة العمودية على المستقيم من البؤرة هي  $2 \times (FE)$  ويمكن كتابتها رياضياً :

$$a + \Delta a = (a + \Delta a) \times \cos \alpha + 2 \times \left( \frac{y_0}{2} \right)$$

ومنها

$$a + \Delta a = \frac{y_0}{1 - \cos \alpha} \quad (4.30)$$

وطبقاً لما جاء به كازاجراند ، أن المسافة  $\Delta a$  تتغير مع زاوية الميل  $\alpha$  وتصبح مساوية صفراً عندما  $(\alpha = 180^\circ)$  .  
وطبقاً للصيغة العملية :

$$\Delta a = (a + \Delta a) \times (0.5 - \frac{\alpha}{360^\circ}) \quad (4.31)$$

وبحل المعادلتين (4.30) و (4.31) آنياً :

من المعادلة (4.30)

$$\Delta a = \frac{y_0}{1 - \cos \alpha} - a$$

نعوض في المعادلة (4.31)

$$\left( \frac{y_0}{1 - \cos \alpha} - a \right) = [a + \left( \frac{y_0}{1 - \cos \alpha} - a \right)] \times (0.5 - \frac{\alpha}{360^\circ})$$

$$\frac{y_0}{1 - \cos \alpha} - a = \frac{y_0}{1 - \cos \alpha} \times (0.5 - \frac{\alpha}{360^\circ})$$

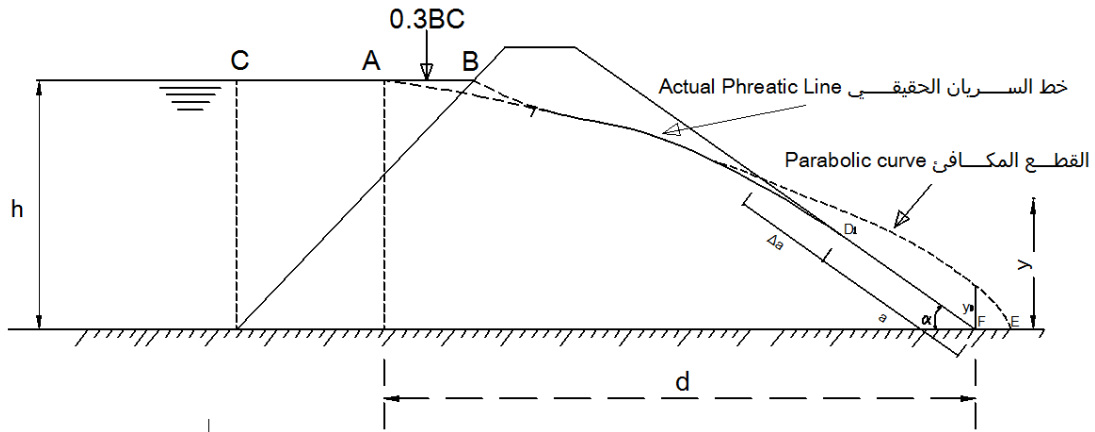
$$a = \frac{y_0}{1 - \cos \alpha} \times (0.5 + \frac{\alpha}{360^\circ}) \quad (4.32)$$

أيضاً يمكن إيجاد  $a$  باستخدام الشكل (٤-١٠) . أو المعادلة (4.23) يمكن أن تستخدم كبديل آخر لتقدير قيمة  $a$  .

$$a = \sqrt{h^2 + d^2} - \sqrt{d^2 - h^2 \cot^2 \alpha}$$

أما السريان عبر السد يمكن إيجاده باستخدام المعادلة (4.19)

$$q = K \times a \times \sin^2 \alpha$$



الشكل (٤-٣): نواة السد الترابي المبين في الشكل (٤-٢)

مثال (٤-٤)

في السد المبين في الشكل (٤-٤) ، نفاذية النواة المركزية للسد هي  $3 \times 10^{-6} \text{ ft/sec}$  في الاتجاه الأفقي و  $1 \times 10^{-6} \text{ ft/sec}$  في الاتجاه الرأسي . كلا وجهي النواة يميل بزاوية  $40^\circ$  مع الأفقي . أوجد السريان خلال السد .

الحل

في التربة الغير إيزوتروبية anisotropic (تتغير خصائصها بتغير الاتجاه) عندما  $K_x$  غير مساوية لـ  $K_y$  ، فإن شبكة التدفق لا يمكن رسمها كما في التربة الإيزوتروبية isotropic . لذلك ، لرسم شبكة التدفق في التربة الغير إيزوتروبية ، فإنه يجب أن تستبدل كل الأبعاد الأفقية بأبعاد افتراضية وذلك باستخدام المعادلة التالية :

$$x' = x \times \sqrt{\frac{K_z}{K_x}} \quad (4.33)$$

حيث :

$x'$  الأبعاد الأفقية الحقيقية

$x'$  الأبعاد الأفقية الافتراضية (المعدلة)

$K_x$  النفاذية في الاتجاه الأفقي

$K_z$  النفاذية في الاتجاه الرأسي

لذا ، ستعدل المسافات الأفقية للنواة بالقيمة :

$$\sqrt{\frac{K_z}{K_x}} = \sqrt{\frac{1 \times 10^{-6}}{3 \times 10^{-6}}} = 0.58$$

الشكل (٤-٥) يوضح مقطع النواة الافتراضية (المعدلة)

من الشكل (٤-٥) زاوية الميل الجديدة  $\alpha$  هي

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{100}{69.1}\right) = 55.35^\circ$$

$$CB = \frac{90}{\tan 55.35^\circ} = 62.2 \text{ ft}$$

$$AB = 0.3 \times CB = 0.3 \times 62.2 = 18.7 \text{ ft}$$

$$CA = 62.2 - 18.7 = 43.5 \text{ ft}$$

$$d = 69.1 + 17.4 + 69.1 - 43.5 = 112.2 \text{ ft}$$

من المعادلة (4.25)

$$y_o = \sqrt{d^2 + h^2} - d$$

$$y_o = \sqrt{112.2^2 + 90^2} - 112.2 = 31.66 \text{ ft}$$

من المعادلة (4.32)

$$a = \frac{y_o}{1 - \cos \alpha} \times \left(0.5 + \frac{\alpha}{360^\circ}\right)$$

$$a = \frac{31.66}{1 - \cos 55.35^\circ} \times \left(0.5 + \frac{\alpha}{360^\circ}\right)$$

معدل النفاذية (K) للنواة هي :

$$K = \sqrt{K_x \times K_z} \quad (4.34)$$

$$K = \sqrt{1 \times 10^{-6} \times 3 \times 10^{-6}} = 1.73 \times 10^{-6} \text{ ft/sec}$$

السريان عبر السد يمكن إيجاده باستخدام المعادلة (4.19)

$$q = K \times a \times \sin^2 \alpha$$

$$q = 1.73 \times 10^{-6} \times 48 \times \sin^2 55.35^\circ = 5.6 \frac{\text{ft}^3}{\text{sec}} \text{ per foot}$$

مناقشة : ١

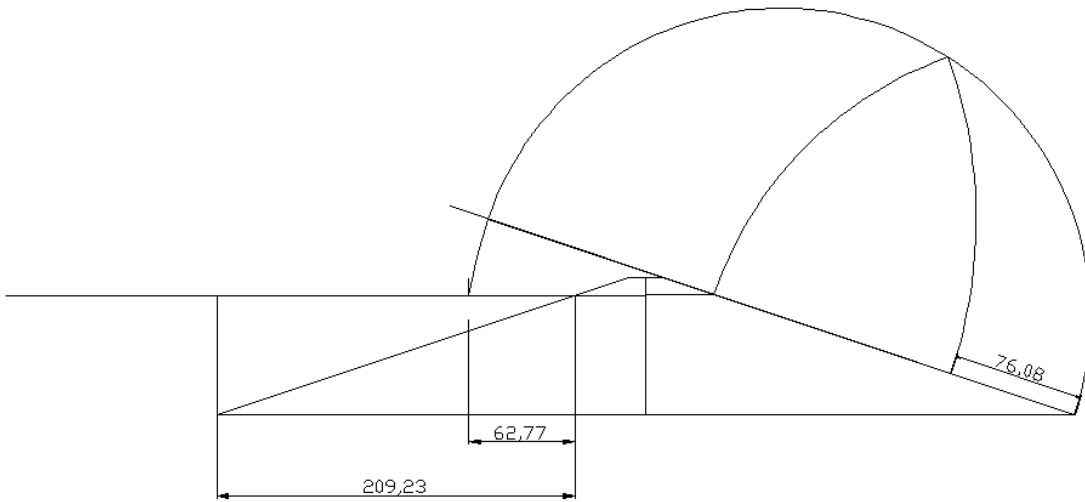
اسم الطالب:

في المثال (٢-٤) ، أوجد

١. كمية السريان لمائة قدم (100 ft) من مقطع السد (Q) باستخدام الحل البياني Graphical solution لإيجاد a . (ارسم مقطع السد على ورقة بيانية باستخدام مقياس رسم مناسب .
٢. كمية السريان لمائة قدم (100 ft) من مقطع السد (Q) باستخدام حل دوبيوت .

الحل

(١) من الرسم التالي قيمة a هي 76.08 ft



السريان عبر السد يمكن إيجاده باستخدام المعادلة (4.15)

$$q = K \times (a \sin \alpha) \times (\tan \alpha)$$

$$q = 0.002 \times (76.08 \sin 18.35^\circ) \times (\tan 18.35^\circ) = 0.0152 \frac{\text{ft}^2}{\text{min}} / \text{ft}$$

$$Q = q \times 100 = 0.0152 \times 100 = 1.52 \text{ ft}^3 / \text{min}$$

(٢) كمية السريان لمائة قدم (100 ft) من مقطع السد (Q) باستخدام حل دوبيوت - المعادلة (4.12)

$$q = \frac{K(h_1^2 - h_2^2)}{2L}$$

$$q = \frac{0.002 \times (70^2 - 0^2)}{2 \times 290} = 0.0169 \frac{\text{ft}^2}{\text{min}}/\text{ft}$$

$$Q = q \times 100 = 0.0169 \times 100 = 1.69 \text{ ft}^3/\text{min}$$