المحاضرة الثالثة

السدود الترابية

مقدمة :

السد الترابي هو حاجز ترابي كتيم يعترض المجرى المائي مشكّلاً خلفه بحيرة . ولا شك أن السدود الترابية من أقدم أنواع السدود التي أقيمت من قبل الإنسان قبل عدة آلاف من السنين قبل الميلاد ، في كل من مصر والهند وبيرو وغيرها من البلدان .

٣-١- تصنيف السدود الترابية :

٣-١-١- حسب مادة البناء المستخدمة :

- سدود ترابية طبيعية :

فيها ينجز حوالي % 50 وأكثر من حجم السد من التربة الغضارية ناعمة الحبيبات ، التربة الرملية أو الحصوية الرملية .

- سدود ترابية حجرية (ركامية) :

يتألف القسم الأساسي من جسم السد من ترب زلطية حصوية خشنة أو فتات صخري . وتحتوي على عنصر مضاد للرشح مقام من تربة غضارية أو الترب ناعمة الحبيبات (سيلت – سيلت غضاري – غضار رملي ...) .

- سدود حجرية :

يتألف القسم الأكبر منها من ترب خشنة الحبيبات "كتل حجرية" والعنصر المضاد للارتشاح فيقام من مواد لا ترابية (جدران حاجزة داخلية – حواجز رقيقة) . ويمكن استخدام الفولاذ أو الرقائق البلاستيكية أو الخرسانة الإسفلتية أو الخرسانة العادية في بنائه .

لكافة هذه الأنواع من السدود مقطع عرضي على هيئة شبه منحرف مع خط محيطي مستقيم أو منكسر لميل الواجهتين الأمامية والخلفية وإن ميل المنحدرات يعطى $m = \cot g\ \alpha$ حيث α زاوية ميل المنحدر .

الحافة العليا من السد تسمى القمة ، أما الحافة السفلى فتسمى بالقاعدة ، أما الأقسام الأفقية على المنحدر فتسمى بالمصاطب .

٣-١-٢- حسب التصميم :

تقسم السدود الترابية إلى ما يلي :

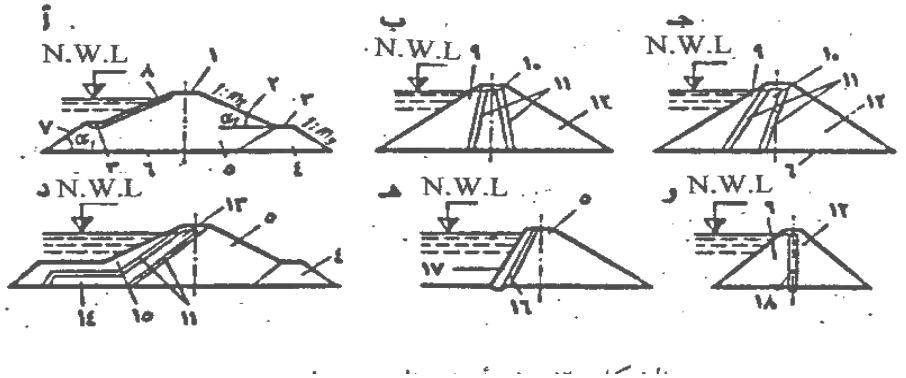
- سدود متجانسة شكل (٣-١-آ) مقامة بدون عنصر مضاد للارتشاح .

- سدود غير متجانسة شكل (٣-١-ب ، ج ، د ، هـ ، و) ويتكون جسم السد من التربة المتجانسة ويحتوي على عنصر مضاد للارتشاح من ترب ناعمة جداً (نواة مركزية) ، نواة مائلة - شاشة مع حصيرة - جدران من البيتون الإسفلتي - جدار بيتوني) .

٣-١-٣- حسب طريقة الإنشاء :

- **سدود ردمية :** تشيد بطريقة الردم على هيئة طبقات ، الواحدة تلو الأخرى وثم دحل كل طبقة ميكانيكياً للوصول إلى الكثافة التصميمية .

- **سدود ترسيبية :** يتم إنشاؤها بطريقة إهالة التربة في النهر (التجريف الهيدروليكي) وذلك بنقل التربة بمساعدة الماء الموجه بمضخات خاصة بذلك إلى جسم السد .



الشكل (٣-١) أنواع السدود الترابية

١-قمة السد ٢- المنحدر الأمامي ٣،٤- مصطبة وموشور تصريف المياه ٥- موشور جسم السد ٦- قاعدة السد ٧- المنحدر الخلفي ٨- طبقة تكسية للمنحدر الأمامي ٩- موشور جسم السد الأمامي ١٠- نواة مركزية ١١- مناطق انتقالية ١٢- موشور جسم السد الخلفي ١٣- شاشة مضادة للارتشاح ١٤- حصيرة كتيمة أرضية ١٥- جسم السد ١٦- طبقة تمهيدية تحت الجدار الحاجز اللاترابي في السد ١٧- الجدار الحاجز اللاترابي في السد ١٨- حاجز رقيق في قلب السد

- **سدود نصف ترسيبية :** تنشأ النواة فقط بواسطة التجريف الهيدروليكي وينشأ باقي جسم السد بطريقة الردم الجاف .

- سدود تبنى بطريقة التفجير الموجه : تنشأ هذه السدود من الفتات الصخري الناتج عن عمليات تفجير جوانب الموقع . شروط استخدام هذه الطريقة أن يكون الموقع ضيقاً ويقع في مناطق جبلية أي عمق الوادي أكبر من عرضه. ومن مساوئ هذا النوع من السدود بأنها ذات نفوذية كبيرة للماء .

٣-١-٤- حسب ارتفاع السد :

- سدود منخفضة الارتفاع $H \leq 30$ m وتعتبر من الدرجة IV .
- سدود متوسطة الارتفاع $30 \leq H \leq 75$ وتعتبر من الدرجة III .
- سدود عالية $75 < H \leq 125$ وتعتبر من الدرجة II .
- سدود عالية جداً $H > 125$ m وتعتبر من الدرجة I .

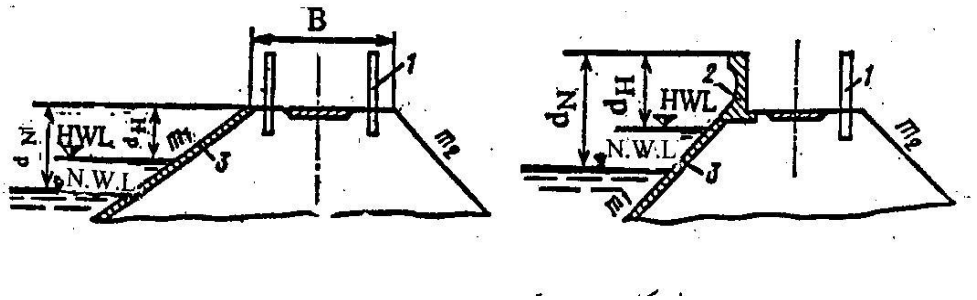
٣-٢- تحديد أبعاد السد الترابي :

٣-٢-١ ارتفاع السد الترابي أو منسوب القمة (Crest elev) :

انطلاقاً من شرط عدم السماح للماء أمام السد من العبور فوقه يضاف إلى منسوب التخزين النظامي NWL ارتفاع إضافي d_N أو إلى منسوب الفيضان HWL ارتفاع d_H شكل (٣-٢) وبالتالي ارتفاع جسم السد هو مجموع ارتفاع التخزين أمام السد H والارتفاع الإضافي d أي :

$$H_D = H + d$$

H : ارتفاع التخزين ويتم تحديده بالاعتماد على المخطط الطبوغرافي في منطقة السد والتي تشمل موقع السد مع بحيرة التخزين .



الشكل (٣-٢) تحديد منسوب قمة السد

1- حاجز الطريق (درابزين) 2- جدار للحماية من انزلاق الأمواج 3- طبقة تكسية

إن منسوب التخزين النظامي NWL أمام السد هو المنسوب الذي يقابل الحجم المائي المطلوب تخزينه والذي يمثل السعة التخزينية المفيدة والقابلة للاستعمال مضافاً إليها الحجم الميت من بحيرة التخزين وغير القابل للاستعمال DSL .

إن منسوب التخزين في حالة الفيضان HWL هو منسوب التخزين النظامي مضافاً إليه مقدار الارتفاع بالبحيرة والناتج عن حجم الجريان الفيضاني الذي يأخذ قيمة عملية 20 ÷ 70 cm من أجل موجة فيضانية $P_{1\ \%}$ أما في حالة الموجات الفيضانية $P_{0,1\ \%}$ أو $P_{0,01\ \%}$ فإن الارتفاع يصل إلى 1 ÷ 3 m فوق المنسوب NPL .

منسوب قمة السد يعطى بالعلاقات :

$$\nabla C.D = \nabla NPL + d_N$$

$$\nabla C.D = \nabla HWL + d_H \qquad (3\text{-}1)$$

الارتفاع الإضافي d يعطى بالعلاقة :

$$d = h + \Delta h + a \qquad (3\text{-}2)$$

حيث h : ارتفاع الأمواج .

Δh : ارتفاع انزلاق الموجة على المنحدر الأمامي .

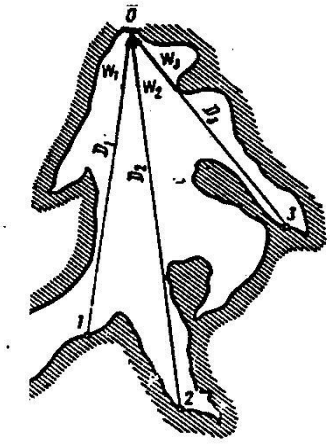
a : ارتفاع احتياطي للأمان ويؤخذ $a \geq 0{,}5$ m أو $a = 0{,}4\ h_{1\%}$.

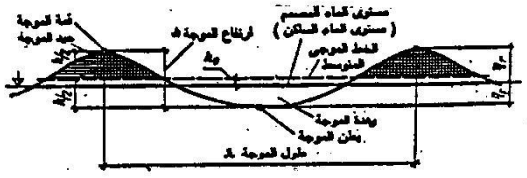
$h_{1\%}$: ارتفاع الموجة بأرجحية 1 % .

– ارتفاع الأمواج h :

إن نوع الأمواج وقيمة بارامتراتها أي خواصها المتغيرة (الارتفاع h ،الفترة الزمنية τ ، الطول λ) كما هو مبين بالشكل (٣–٣) تعتمد جميعها على العوامل المكونة للأمواج وهي سرعة الريح W ، مدة تأثير الريح t ، عمق الحوض المائي H ومسافة انسياق الموجة D (المسافة المستقيمة الفاصلة بين الشاطئ والسد شكل (٣–٤)) ويمكن اعتبار قيمة D هو طول البحيرة المتعامد مع محور السد .

تحدد قيمتها من وردة الرياح .





الشكل (٣–٣) البارمترات الموجية

الشكل (٣–٤) مسافة انسياق الموجة

يقسم المجال الموجي للحوض المائي على طول مسافة الانسياق الموجي إلى المناطق التالية كما في الشكل (٣–٥) :

– المنطقة I وهي منطقة عميقة المياه ($H > \lambda/2$) حيث لا يؤثر القاع عملياً على بارامترات

الأمواج .

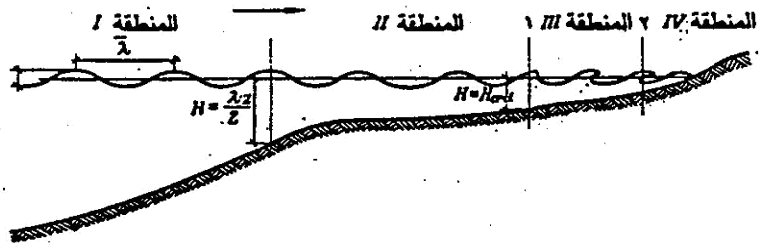
– المنطقة II منطقة ضحلة المياه ($\frac{\lambda}{2} > H \geq H_{crit}$) وكلما قلّ العمق فيها قلَّ طول وسرعة الأمواج وزاد ميل سطح المنحدر الأمامي واعتدال ميل السطح المنحدر الخلفي

(عند $H = H_{crit}$ تتحطم الأمواج وتتحول إلى أمواج متقطعة)

– المنطقة III وهي منطقة الأمواج المتقطعة الاضطرابية التي تتغلب على نفسها أثناء الحركة ($H < H_{crit}$) .

– المنطقة IV : وهي المنطقة الحافية التي تتحطم عندها الأمواج ثم تطغى بعدها على الشاطئ .

ومن أجل حساب d_N تؤخذ سرعة الرياح التصميمية بأرجحية % 1 أما من أجل حساب d_H فتؤخذ السرعة بأرجحية % 50 .



شكل (٣–٥) تقسيم المنطقة المائية إلى مناطق تبعاً للعمق

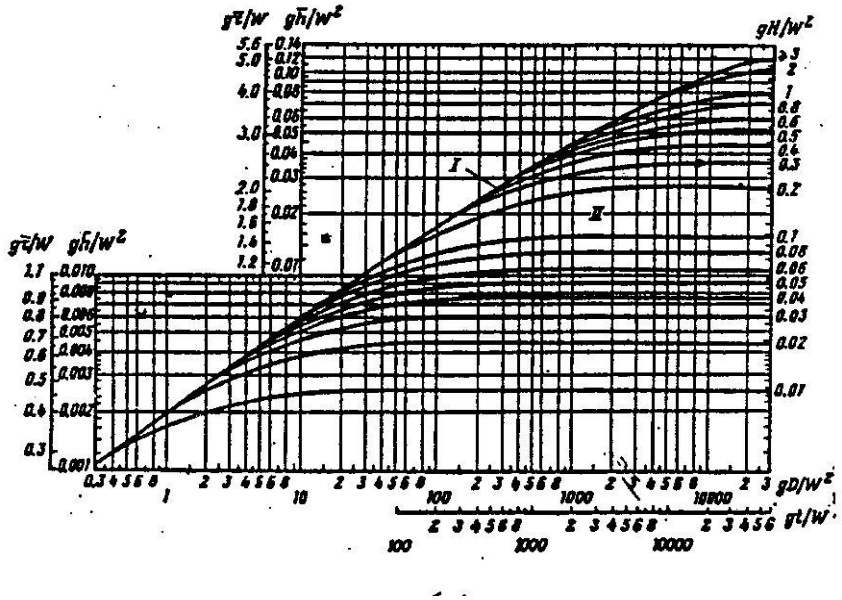
I- المنطقة العميقة II– المنطقة الضحلة III– منطقة الأمواج المضطربة الشاطئية IV– المنطقة الحافية قرب الشاطئ

1- الخط الأول لتحطيم الأمواج 2– الخط الثاني لتحطيم الأمواج

إن حزمة الأمواج الناشئة عن العاصفة المقدرة تتميز بقيمتيها المتوسطتين $\bar{\lambda}, \bar{\tau}$ ولتحديد هاتين القيمتين يحسب باستخدام القيم المعلومة W , H , D البارامترات اللابعدية التالية: gH/W^2 , gD/W^2 , gt/W

حيث t : مدة العاصفة وتؤخذ بشكلٍ أولي $t = 6\ h = 21600\ sec$.

بعد ذلك يستخدم النوموغرام (nomogram) شكل (٣–٦) (استناداً إلى المواصفات القياسية السوفييتية للبناء) لإيجاد $g\bar{\tau}/W, g\bar{h}/W^2$. إن المنحني الغلافي للنوموغرام ، يناظر منطقة المياه العميقة التي تحسب منها قيم $\bar{h}$, $\bar{\tau}$ استناداً إلى البارامترات الأساسية gD/W^2 أو gt/W .



الشكل (٣–٦) الرسم البياني لتحديد القيم المتوسطة لعناصر الأمواج الناجمة عن الرياح في المنطقة I العميقة وفي المنطقة II الضحلة (عندما يبلغ انحدار القاع $i \le 0{,}001$)

وبتحديد قيم $g\bar{\tau}/W, g\bar{h}/W^2$ تستخدم قيمهما الصغرى لتحديد معدل ارتفاع الموجة $\bar{h}$ ومعدل الفترة الزمنية للموجة $\bar{\tau}$.

إن المجال الموجي الواقع أسفل المنحني الغلافي يناظر منطقة المياه الضحلة التي يبلغ ميل قاعها $i \le 0{,}001$ ويجري حساب القيمتين $\bar{h}$, $\bar{\tau}$ استناداً إلى البارامترين gH/W^2 و gD/W^2 والبارامترين $(gt/W, gH/W^2)$من القيمة الصغرى .

معدل طول الموجة في المنطقة العميقة المياه يعطى بالعلاقة :

$$\bar{\lambda} = \frac{g\bar{\tau}^{2}}{2\pi} \qquad (3\text{-}3)$$

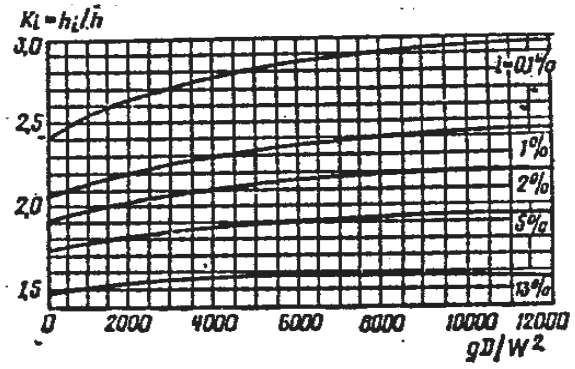
ارتفاع الموجة بأرجحية % i تحسب بالعلاقة التالية :

$$h_i = h_{1\,\%} . f . K_c . K_{Hr} . K_{Hi} . K_\beta \qquad (3\text{-}4)$$

حيث $h_{1\,\%}$: ارتفاع الموجة بأرجحية % i =1 ويحدد بالعلاقة :

$$h_{1\%} = \bar{h} . K_i \qquad (\text{-}5)$$

K_i : معامل يحدد وفق المخطط شكل (٣–٧) عند احتمال حدوث العاصفة % i =1 تبعاً لقيمة البارامتر اللابعدي gD/W^2 .



لشكل (٣–٧) مخطط قيم المعامل K_i

f : معامل تتبع قيمته للنسبة $\varepsilon = d/h_1$ % حيث d : القطر الوسطي لحجارة تكسية المنحدر (حالة التكسية من الحجارة) أو طول ضلع الكتلة البيتونية (حالة التكسية بكتل بيتونية) وتأخذ f قيمة 0,9 في حالة التكسية ببلاطات بيتونية أو بيتونية مسلحة وتعطى قيم f وفق الجدول (٣–١) .

جدول (٣–١) قيم f تبعاً لـ $\varepsilon = d/h_1$ %

نوع التكسية	$\varepsilon = d/h_1$ %	f
بلاطات بيتونية – بيتونية مسلحة	-	0,9
حجارة مكسرة – أو كتل بيتونية	< 0,002	0,9
	0,007	0,81
	0,02	0,72
	0,05	0,56
	0,1	0,45
	≥ 0,2	0,35

K_c : معامل يحدد وفق الجدول (٣–٢) ويتبع إلى سرعة الرياح W وميل المنحدر m .

جدول (٣–٢) قيم K_c

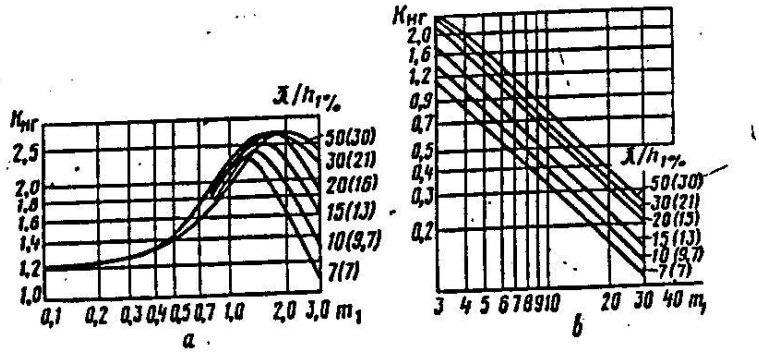
سرعة الرياح W (m/s)	ميل المنحدر			
	0,4	0,4 2	3 5	5
≥ 20	1,3	1,4	1,5	1,6
≤ 10	1,1	1,1	1,1	1,2

K_β: معامل يتبع قيمة β زاوية ميل اتجاه الرياح مع الشاقول على محور السد وتعطى قيمته بالجدول (٣-٣) .

جدول (٣-٣) قيم K_β

β	0	10	20	30	40	50	60
K_β	1	0,98	0,96	0,92	0,87	0,82	0,75

K_{Hr} : معامل يتبع للنسبة $\bar{\lambda}/h_{1\%}$ ويعطى وفق المخطط شكل (٣-٨) .



الشكل (٣-٨) مخطط لإيجاد قيم المعامل K_{Hr}

a) عند $m_1 < 3$ ، b) $m_1 \geq 3$ ميل المنحدر

K_{Hi} : معامل يأخذ بعين الاعتبار قيمة الأرجحية i % ويعطى بالجدول (٣-٤) .

جدول (٣-٤) قيم K_{Hi} تبعاً لـ i %

I %	0,1	1	2	5	10	30	50
K_{Hi}	1,1	1,0	0,96	0,91	0,86	0,76	0,68

حساب ارتفاع الأمواج يتم وفق العلاقة (3-4) يتم بفرض أن الماء عميق أمام السد أي $H > 0{,}5\bar{h}$ أو $H \geq 2h_{1\%}$ لذلك بعد حساب $\bar{\lambda}$ بالعلاقة (3-3) من الضروري التحقق من الفرض .

عندما يكون العمق $H < 2\ h_{1\ \%}$ فالمعامل K_{Hr} يتم حسابه من الشكل (٣-٨) بما يوافق قيم $\bar{\lambda}/h_{1\%}$ ضمن الأقواس .

– ارتفاع انزلاق الأمواج Δh :

يحدد الارتفاع Δh بالعلاقة التالية :

$$\Delta h = K_B \frac{W^2 D}{g H} \cos\alpha \qquad (3\text{-}6)$$

حيث K_B : معامل يتبع سرعة الرياح ويعطى بالجدول (٣–٥) .

W : سرعة الرياح على ارتفاع 10 m من منسوب سطح الماء وتقدر بـ (m/s) .

D : مقدار انسياق الموجة (m) .

H : عمق بحيرة السد (m) .

α : الزاوية المحصورة بين اتجاه الريح ومحور البحيرة العمودي على السد.

جدول (٣–٥)

W (m/s)	≤ 20	30	40	50
K_B	$2{,}1\times10^{-6}$	3×10^{-6}	$3{,}9\times10^{-6}$	$4{,}8\times10^{-6}$

ملاحظة : سرعة الرياح التصميمية التي تدخل في حساب ارتفاع الأمواج تؤخذ بأرجحية 1 % عن منسوب الماء في البحيرة NWL وبأرجحية 50 % عند المنسوب HWL وتبلغ أرجحية العاصفة التصميمية لتحديد عناصر الموجة وفق الكود الروسي 2 % من أجل المنشآت I و II و 4 % للمنشآت من الدرجة III و IV .

٣–٢–٢– عرض قمة السد وتصميمها :

إن عرض قمة السد يتعلق بالاعتبارات التالية :

– نوعية المواد الترابية المستعملة في بناء السد ودرجة المنشأة .

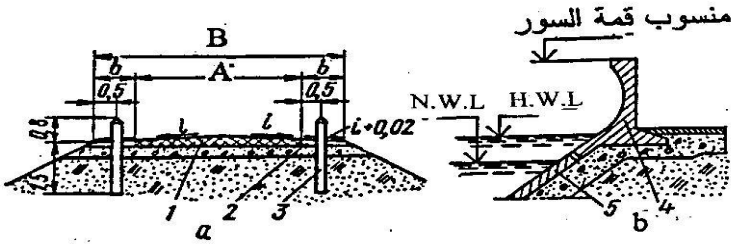
– إمكانية استثمارها كطريق لمرور آليات . بشرط أن لا يقل العرض عن 4,5 m .

يحدد عرض قمة السد وفق الجدول (٣–٦) تبعاً لدرجة الطريق المار فوق السد .

جدول (٣-٦) العناصر الأساسية للمقطع العرضي للطريق فوق قمة السد

درجة الطريق	عرض القمة (m)		
	عرض الطريق A (m)	عرض الجانب b (m)	عرض قمة السد (m)
II	7,5	3,75	15
III	7	2,5	12
IV	6	2,00	10
V	4,5	1,75	8

يبين الشكل (٣-٩) تفصيلة لقمة السد حيث يعطى للطبقة الإسفلتية ميل $i \geq 1,5\ \%$ وفي حالة تغطية القمة بمواد بحصية يكون الميل العرضي $i \geq 3\%$ ويعطى لجوانب الطريق والتي عرضها (b) ميل أكبر 0,02 وتزرع بها حواجز بيتونية أو معدنية أو على شكل سور يعمل على حماية القمة من الأمواج .



الشكل (٣-٩) تفصيلة قمة السد a) بدون سور b) مع سور

1- الطريق 2– الجانب 3– أعمدة مغروزة بالقمة 4– سور 5– طبقة تكسية للمنحدر

وهناك علاقات تجريبية تعطي قيمة عرض قمة السد بدلالة ارتفاعه منها :

- علاقة Knappen :

$$B = 1,65\sqrt{H_D} \qquad (3\text{-}7)$$

حيث B : عرض قمة السد (m) .

H_D : ارتفاع السد (m) .

- علاقة بريس :

$$B = 1,1\sqrt{H_D} + 1 \qquad (3\text{-}8)$$

H_D : ارتفاع جسم السد (m) .

٣-٢-٣- ميول جوانب السد :

إن ميل الجوانب يتعلق بنوعية المواد التي تدخل في إنشاء السد وبنوع السد فمن أجل تحديد أولي لهذه الميول يمكن اعتماد القيم الواردة في الجداول (٣-٧) – (٣-٨) .

جدول (٣-٧) ميول منحدرات السدود الترابية

نوع السد	ميل المنحدرات تبعاً لارتفاع السد (m)					
	حتى 5 m		5 ÷ 10		10 ÷ 15	
	الأمامي	الخلفي	الأمامي	الخلفي	الأمامي	الخلفي
• متجانس بدون موشور صرف – تربة غضارية (C)	2	1,75	2,5	2	3	2,25
– تربة رملية (S)	2,5	2	2,75	2,25	3	2,25
• متجانس مع موشور صرف – تربة غضارية (C)	2	1,5	2,5	1,75	3	2,0
– تربة رملية (S)	2,5	1,75	2,75	2	3	2,0
• غير متجانس بدون مصرف رملي مع نواة (غضار رملي)	3	2	3	2	3,25	2,5
رملي مع شاشة (غضار رملي)	2,25	2	2,5	2,25	3	2,5
رمل مع بحص مع نواة (غضار) أو سيلت	2,5	2,5	3	3	3	3

على المنحدرات العالية يجب إنشاء مصاطب أفقية بتباعد 10÷15 m شاقولياً عرض هذه المصاطب 1 ÷ 3 m على منحدرات السدود الترابية ، أما على منحدرات السدود الحجرية أو الركامية فعرض المصطبة يجب أن لا يقل عن 3 m .

جدول (٣–٨) ميول منحدرات السدود الركامية

نوع السد الركامي	تربة جوانب الحماية (تربة جسم السد)	المنحدر الأمامي	المنحدر الخلفي
مع نواة مركزية (رمل غضاري، رمل سيلتي ، غضار – سيلت)	ردميات صخرية ردميات حصوية زلطية	1,3 ÷ 1,8 2 ÷ 2,25	1,3 ÷ 1,7 1,8 ÷ 2,2
مع نواة مائلة (غضار ، سيلت ، غضار رملي)	ردميات صخرية ردميات حصوية زلطية	1,5 ÷ 2 2,2 ÷ 2,7	1,2 ÷ 2,6 1,7 ÷ 2
مع شاشة (غضار ، سيلت ، رمل سيلتي، رمل غضاري)	ردميات صخرية ردميات حصوية زلطية	2 ÷ 3,5 2 ÷ 3,5	1,2 ÷ 1,6 1,7 ÷ 2
مع (ديافراغما) جدار حاجز (بيتون إسفلتي ، بيتون ، إسمنت محقون)	ردميات صخرية ردميات حصوية زلطية	1,3 ÷ 1,7 1,8 ÷ 2,2	1,3 ÷ 1,7 1,8 ÷ 2,2

٣–٢–٤– أبعاد العنصر المانع للرشح (نواة – شاشة) :

سماكة النواة المركزية من الأسفل تنحصر بالقيمة H_D (0,5 ÷ 0,3) .

سماكة النواة المائلة من الأسفل هي H_D (0,4 ÷ 0,2) .

سماكة الشاشة H_D (0,3 ÷ 0,1) .

حيث H_D : ارتفاع جسم السد .

القيم الكبيرة تتوافق مع السدود العالية .

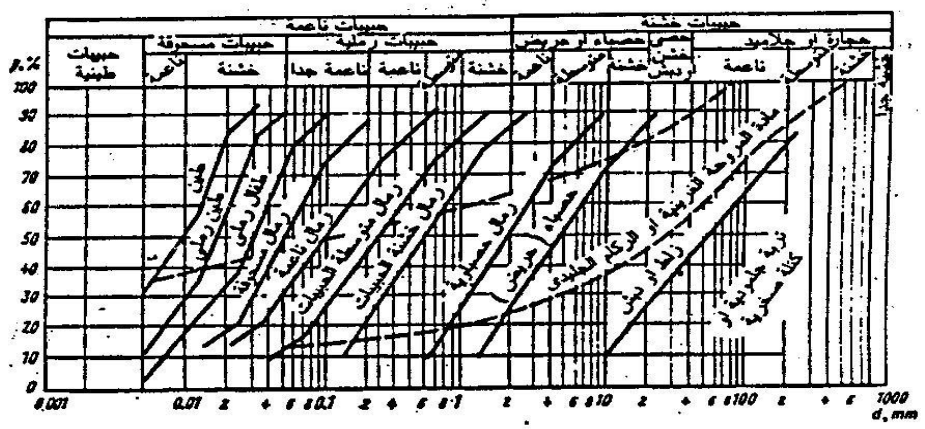
٣-٣- التربة كمادة لبناء السدود الترابية :

عند تصميم السدود الترابية من الضروري معرفة خواص الترب المستخدمة في البناء والتي يمكن دراستها بالتفصيل في ميكانيك التربة (Soil mechanics) .

٣-٣-١- الخواص الجيوتكتيكية للتربة :

٣-٣-١-١ التركيب الحبي :

من أهم خواص التربة هو تركيبها الحبي الذي يحدد خواص التربة في عديد من الحالات ، ويبين الشكل (٣-١٠) الحدود السفلى للتركيب الحبي وأسماء الحبيبات الفتاتية من حيث حجومها .



الشكل (٣-١٠) التراكيب الحبيبية لمختلف أنواع التربة

في أغلب الأحيان ، يتم إنشاء جسم السد أو الإنشاءات المضادة للرشح من تربة متنوعة التركيب الحبي ومؤلفة من خليط من التربة الناعمة الحبيبات والتربة الخشنة الحبيبات .

إن التركيب الحبيبي المختلف يحدد بواسطة معامل اللاتجانس (التغاير) كما يلي :

$$\eta = \frac{d_{60}}{d_{10}} \qquad (3\text{-}9)$$

حيث d_{60} , d_{10} هي على التوالي أقطار الحبيبات المارة بنسبة % 60 و% 10 من وزن التربة . وهذا المعامل مهم جداً لتصنيف الترب المفككة التي تنشأ منها السدود الترابية .

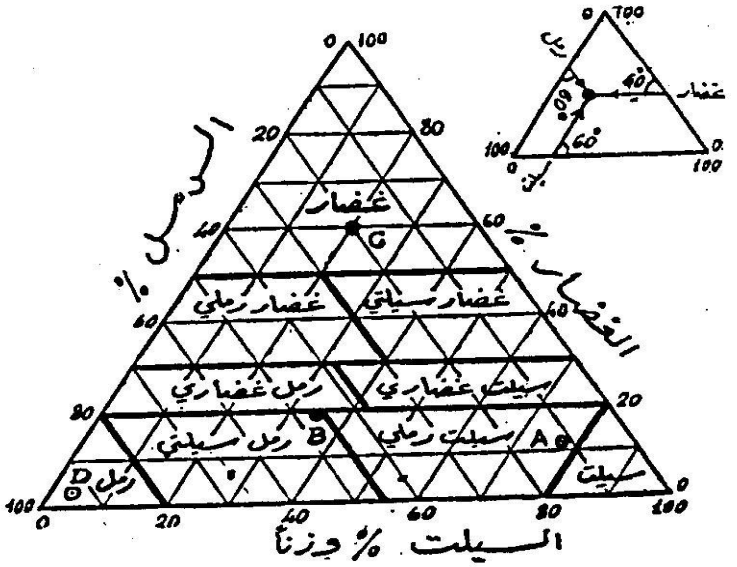
بشكل أساسي : إذا كان $\eta \leq 3$ التربة متجانسة وبخلاف ذلك فالتربة غير متجانسة . وإذا كان $\eta \leq 10$ يمكن إهمال تأثير الانفصال الطبقي عند إهالة التربة في جسم السد ويمكن أن تكون قيمة $\eta = 100 \div 200$ في الترب الحصوية – الزلطية والفتات الصخري وبالنسبة للترب الخشنة الحبيبات يمكن أن يستخدم مفهوم معدل الحجم الموزون للحبيبات (Meanweighted size) :

$$D_{mw} = \frac{\sum_{1}^{n} d_i \ \Delta P_i}{100} \qquad (3\text{-}10)$$

حيث ΔP_i : محتوى الحبيبات الفتاتية التي قطرها d_i % ، وبشكلٍ عام يمكن أن يكون $d_{m.w} \approx d_{50}$.

التربة ذات الحبيبات الناعمة والتي تحتوي في تركيبها الحبيبي على ذرات

غضارية $d \leq 0{,}005$ mm تسمى بالترب الطينية وينتمي إليها الغضار والغضار الرملي والسيلت ويمكن تصنيف الترب الطينية باستخدام التمثيل المثلثي للترب الناعمة شكل (٣-١١) .



الشكل (٣-١١) التمثيل المثلثي للتربة

لكن هذا التصنيف ليس دقيقاً بشكلٍ كافٍ لذلك يستخدم التصنيف الذي اقترحه العالم الأستاذ " ك. تيرتساغي " الذي يميز الأشكال المختلفة لقوام التربة : القوام الصلب – القوام اللدن – القوام السائل .

إن الرطوبة عند حدود تحول القوام من شكلٍ إلى آخر تسمى بحد تماسك القوام أو بحد أتربرغ (Atterburg Limit) .

– حد اللدونة W_P % هي الرطوبة التي يتحول عندها القوام الصلب للتربة إلى قوام لدن .

– حد السيولة W_L % هي الرطوبة التي يتحول عندها القوام اللدن إلى قوام صلب .

– دليل اللدونة I_P % هو الفرق بين حد السيولة وحد اللدونة .

$$I_P \% = W_L - W_P \qquad (3\text{-}11)$$

ويمكن معرفة قيمة حد اللدونة من خلال معرفة حد السيولة وذلك وفق العلاقة التالية :

$$W_P = 0{,}75\, W_L - 11 \qquad (3\text{-}12)$$

تستخدم العلاقة (3-12) لتدقيق التجارب .

يمكن معرفة نوع التربة بشكلٍ تقريبي من خلال حد اللدونة :

$W_P \le 7$ سيلت ، $7 < W_P \le 17$ غضار رملي ، $17 < W_P \le 30$ غضار مطفئ ، $W_P > 30$ غضار ، $30 < W_P \le 60$ غضار دهني ، $60 < W_P \le 100$ غضار دهني جداً ، $W_P > 100$ تربة رملية لا تحتوي على غضار

بالاعتماد على قيم حد اللدونة والسيولة ، وحسب اقتراح العلماء : كاساغراندي (1948) وب. سيد ، ك لورفارد ، ب لينوغرين (1969) يمكن معرفة ما إذا كانت التربة تحتوي على مواد عضوية أم لا فإذا كان :

$$W_P > 0{,}98\,(W_L - 27{,}5) \qquad (3\text{-}13)$$

فإن التربة لا تحتوي على مواد عضوية وبخلاف ذلك فهي تحتوي على المواد العضوية .

ويمكن من خلال تحليل ترب المقلع معرفة بعض خواص التربة قبل إهالتها في جسم السد فإذا كان :

$$W_P < 0{,}98\,(W_L - 27{,}5) \qquad (3\text{-}14)$$

فالتربة تتشقق بشكل ضعيف عندما $W > I_P$ الرطوبة الطبيعية للتربة ، أما إذا كان $W_L > 50$ % فالتربة تتميز بمتانة عالية عندما تكون رطوبتها الطبيعية قليلة .

يمكن معرفة قوام التربة من خلال دليل القوام :

$$I_L = \frac{W - I_P}{W_L - I_P} \qquad (3\text{-}15)$$

وحسب هذا الدليل يمكن أن تنقسم الترب الطينية إلى الأنواع التالية :

I_L	غضار (C) – غضار رملي (CS)	I_L	سيلت رملي (MS)
0	قاسي	0	قاسي
$0 \div 0,25$	نصف قاسي	$1 \div 0$	لدن
$0,25 \div 0,5$	قريب من اللدن	1	سائل
$0,5 \div 0,75$	فوق اللدن		
$0,75 \div 1$	قريب من المائع		
1	مائع		

– الترب الغرينية (الطمي) هي ترب غضارية تحتوي على مواد عضوية وتتميز هذه الترب بصغر كثافتها وبرطوبتها التي يمكن أن تفوق حد السيلان أي أن دليل القوام $I_L > 1$.

– تربة اللوس : هي شكل من أشكال الترب الغضارية تتميز بمعامل التشبع بالماء $S_r < 1$ (انظر الفقرة ٣–٣–١–٧) والمسامية $n > 50\ \%$ وتتميز أيضاً بخواصها الرشحية المتباينة أي معامل النفاذية بالاتجاه الشاقولي أكبر منه في الاتجاه الأفقي $K_v > K_h$ وتهبط عند تبللها بالماء وخاصةً تحت تأثير حمولات خارجية تفوق وزنها الذاتي .

٣–٣–١–٢ شكل الحبيبات :

يؤثر شكل حبيبات التربة في كثير من خواصها فالتربة الناعمة يؤثر شكل الحبيبات في الفعل المتبادل بين المعادن والماء وعلى كثافة التربة بالذات أما في الترب الخشنة الحبيبات فتأثير شكل الحبيبات يكون على درجة مساميتها ومقاومتها . ومن معايير أشكال الحبيبات هي النسبة بين الحجوم المميزة للحبيبات من الناحية الكمية ، ويتم تحديد شكل الحبيبات ، فقط بالنسبة للأنواع الخشنة من التربة فإذا كان $d_3 < d_2 < d_1$ عندئذٍ يكون :

$$K_{sh} = \frac{d_3}{d_1} \qquad (3\text{-}16)$$

حيث d_3 : الحجم الحبيبي المميز الأصغري .

d_1 : الحجم الحبيبي المميز الأعظمي .

عندما $K_{sh} = 1$ يعتبر شكل الحبيبات على الأغلب كروياً أو مكعباً .

وفي عملية بناء السدود تفضل التربة التي فيها $K_{sh} > 0,3$.

٣–٣–١–٣ التركيب المينيرالي للتربة :

التراكيب المينيرالية التي تصادف في الترب هي :السيليكات SiO_2 والألومينات AL_2O_3 وأكسيد الحديد Fe_2O_3 وأكاسيد أخرى K_2O, Na_2O, CaO, MgO من حيث حجم الحبيبات نميز نوعين من التراكيب المينيرالية :

أ- **تراكيب أولية** $d > 2$ mm كتل صخرية ، $0,05 \leq d \leq 2$ mm رمال ، $0,005 \leq d \leq 0,05$ سيلت .

ب- تراكيب ثانوية تنتج عن التراكيب الأولية نتيجة لعوامل التعرية وتدخل في تركيب الترب الغضارية ، وتنقسم هذه التراكيب إلى مجموعات عدة :

١- مجموعة المونتمور يللونايت : تتشكل من تفكك المركبات الحديدية المنغيزية وتعريتها وتتصف هذه المجموعة بنشاطها السطحي الشديد لذلك تمتاز بلوراتها بالانتفاخ الشديد عند وجود الماء لأن ذراتها المجهرية تأخذ الماء وتدخله في تركيبها من أنواعها (البينونايت) الذي يستخدم في حقن التربة وتثبيتها .

٢- مجموعة الكاولينات : منها غضار الكاولين (غضار الخزف الصيني) حيث يحتوي غضار الكاولين على كمية من السيليكا SiO_2 أقل من المجموعة الأولى ، ويعتبر الكاولين من أقل أنواع الترب الغضارية نشاطاً إلاّ أنه أصلبها هيكلاً .

٣- مجموعة الاللايت : هي ذات نشاط سطحي أقل من المجموعة الأولى وأكثر من الثانية أما طبقة الاللايت فهي أكثر تماسكاً من غيرها .

ج- تراكيب ملحية : يمكن أن يدخل في تركيب الكثير من الترب تراكيب ملحية شديدة الانحلال : $NaCl$ ، KCl ، $CaCl_2$ ، $NaHCO_3$ ، $CaHCO_3$ ، $MgSO_4$ ، Na_2SO_4 . ويمكـــن أن يدخل الجبس $CaO_4 - 2H_2O$ وهو متوسط الانحلال بالماء .

تحدد النسبة المسموحة للأملاح الشديدة والمتوسطة الانحلال في الترب التي تستخدم في بناء السدود بالقيم % (5 ÷ 0,5) وذلك تبعاً لنوع الترب لأن انحلال الأملاح يؤثر على معامل الرشح في التربة .

٣-٣-١-٤ مسامية التربة n :

هي بالتعريف النسبة بين حجم الفراغات والحجم الكلي للتربة :

$$n = \frac{\gamma_s - \gamma_d}{\gamma_s} \qquad (3\text{-}17)$$

γ_s : الوزن النوعي للحبيبات الصلبة (النسبة بين وزن وحجم الحبيبات الصلبة للتربة) .

γ_d : الوزن الحجمي الجاف (النسبة بين وزن الحبيبات الصلبة إلى الحجم الكلي) .

إن الوزن النوعي للحبيبات الصلبة في التربة يتغير بين $(26,5\div27,5)\ KN/m^3$ ، وإن احتواء التربة على أكاسيد معدنية ، يمكن أن ترتفع قيمة الوزن النوعي في هذه الحالة ارتفاعاً كبيراً تصل $3,5\ KN/m^3$ ، وإذا احتوت التربة على شوائب أو خلائط عضوية ، فسوف يقل الوزن النوعي عن قيمته العامة .

٣-٣-١-٥ معامل المسامية :

هو نسبة المسامات إلى حجم الحبيبات الصلبة (لهيكل التربة) في وحدة الحجم

$$e = \frac{n}{1-n} \quad , \quad e = \frac{\gamma_s - \gamma_d}{\gamma_d} \qquad (3\text{-}18)$$

إذا كانت $e \le 0,5$ عندئذٍ التربة كثيفة أما إذا كانت $e \ge 1$ فالتربة مفككة جداً.

٣-٣-١-٦ الرطوبة الوزنية (W) :

هي النسبة بين وزن الماء في الفراغات ووزن الحبات الصلبة في واحدة الحجم للتربة :

$$W\% = \frac{Q_w}{\gamma_d} \times 100 \qquad (3\text{-}19)$$

حيث Q_W : وزن الماء الموجود في وحدة حجم التربة .

إذا كانت التربة مشبعة تماماً عندئذٍ يكون لدينا :

$$Q_w = \gamma_w . n = \gamma_w \frac{e}{1+e} \qquad (3\text{-}20)$$

γ_W : الوزن النوعي للماء .

ومنه تكون رطوبة الإشباع W_S :

$$W_S = \frac{\gamma_w . e}{(1+e)\gamma_d} = \frac{\gamma_w . e}{\gamma_S} \qquad (3\text{-}21)$$

٣-٣-١-٧ معامل التشبع بالماء أو درجة الإشباع S_r :

إن درجة الإشباع تحدد درجة امتلاء مسامات التربة أو تشبعها بالماء وتعطى بالعلاقة :

$$S_r = \frac{W}{W_S} = W . \frac{\gamma_S}{\gamma_w . e} \qquad (3\text{-}22)$$

عندما $S_r = 0$ تعتبر التربة أحادية الطور (مواد صلبة) .

$S_r = 1$ تعتبر التربة ثنائية الطور (مواد صلبة + ماء) .

في التطبيقات العملية تعتبر التربة أحادية الطور إذا كانت قيمة $S_r=0,7\div0,8$ بعد تحميل التربة

.

٣-٣-١-٨ الوزن الحجمي الرطب للتربة :

هو الوزن الحجمي الجاف مع وزن الماء الموجود في وحدة الحجم .

$$\gamma_b = \gamma_d (1 + W) \qquad (3\text{-}23)$$

عندما تكون التربة مشبهة بالماء يعبر عن الوزن الحجمي الرطب بالوزن الحجمي المشبع γ_{sat} .

$$\gamma_{sat} = \gamma_d + n\,\gamma_w \qquad (3\text{-}24)$$

٣-٣-١-٩ معامل الكثافة النسبية I_D :

يستخدم للتعبير عن قوام الترب الرملية والخشنة الحبيبات :

$$I_D = \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}} \qquad (3\text{-}25)$$

e_{max} , e_{min} هي على التوالي معامل المسامية للتربة الرخوة جداً والتربة المتماسكة جداً .

e : معامل المسامية الفعلية .

عندما $I_D = 1$ تعتبر التربة قابلة للرص بشكلٍ جيد بدون انهيار لحبيباتها .

$I_D = 0$ تعتبر التربة غير قابلة للرص .

عند بناء السدود في الظروف المناخية المعتدلة من أجل ترب خشنة تؤخذ قيمة $I_D \geq 0,9$ ومن أجل الترب الرملية $I_D \geq 0,6 \div 1$.

٣-٣-٢- الخواص الجيوتكتيكية التصميمية للترب المستخدمة في جسم السد :

٣-٣-٢-١ تربة العنصر المضاد للرشح (نواة مركزية – مائلة – شاشة) :

يستعمل في تنفيذ العنصر المضاد مواد ترابية ناعمة ، سيلتية أو غضارية ذات نفوذية تتراوح بين (cm/s) $10^{-8} < K < 10^{-3}$ تكون الأتربة المستعملة من الأصناف التالية :

GC : (بحص غضاري) بنسبة الغضار والسيلت أكبر من % 12 .

GM : (بحص سيلتي) بنسبة الغضار والسيلت أكبر من % 12 .

SC : (رمل غضاري) بنسبة الغضار أكبر من % 12 .

SM : (رمل سيلتي) بنسبة المواد الناعمة أكبر من % 12 .

CL : (غضار) غير عضوي ، حد السيولة أقل من % 50 وإن $I_P > 7$.

ML : (سيلت) غير عضوي ، حد السيولة أقل من % 50 وإن $I_P > 7$.

CH : غضار قيمة $W_L > 50$ % .

MH : سيلت مرن $W_L > 50\ \%$.

وبشكلٍ عام تربة العنصر المضاد للرشح هي ذات أقطار حبيبات $d \leq 1\ mm$ المعطيات التي يجب معرفتها عن تربة النواة :

W_L حد السيولة ، W_P حد اللدونة ، I_P دليل اللدونة ، γ_S الوزن النوعي للتربة ، W_q رطوبة تربة المقلع .

ويمكن من هذه المعطيات إيجاد الخواص التالية للتربة :

١- الرطوبة المثالية W_{opt} : الرطوبة التي تعطي التربة عندها أكبر كثافة ممكنة عند ردمها (دحلها) بجسم السد .

$$W_{opt} = W_P - (2 \div 4)\ \% \qquad (3\text{-}26)$$

فمن أجل تخفيض قيمة الضغط المسامي في جسم النواة يفضل تخفيض هذه الرطوبة بمقدار 1 % إلى ما يسمى بالرطوبة التصميمية :

$$W_d = W_{opt} - 1\ \% \qquad (3\text{-}27)$$

وإذا كانت رطوبة تربة المقلع $W_q > W_d$ فيجب اللجوء إلى تجفيف التربة المردومة في جسم النواة للوصول إلى الرطوبة المطلوبة .

٢- الوزن الحجمي الجاف لهيكل التربة يعطى بالعلاقة :

$$\gamma_d = \frac{\gamma_S \gamma_w (1 - V_0)}{\gamma_w + W_d . \gamma_S} \qquad (3\text{-}28)$$

حيث γ_S , γ_W : الوزن النوعي للماء وحبيبات التربة على التوالي .

V_0 : حجم الهواء المحصور في فراغات التربة ويتراوح بين $V_0 = 0{,}03 \div 0{,}06$ للترب الغضارية و $V_0 = 0{,}07 \div 0{,}089$ لتربة اللوس .

W_d : الرطوبة التصميمية .

٣- معامل المسامية e ، والمسامية n :

$$e = \frac{\gamma_S - \gamma_d}{\gamma_d} \qquad n = \frac{e}{1 + e} \qquad (3\text{-}29)$$

٤- التماسك C وزاوية الاحتكاك φ° يتم تعيينها من الجدول (٣-٩) بدلالة e و% W_P ونوع التربة .

جدول (٣-٩) قيم C وφ° للترب الغضارية – والترب الرملية

نوع التربة	زاوية الاحتكاك الداخلي φ°

	التماسك النوعي للتربة (MPa)					
	عند معامل المسامية e					
	0,41-0,5	0,51-0,6	0,61-0,7	0,71-0,8	0,81-0,95	0,96-1,1
التربة الرملية						
التربة الحصباوية والخشنة الحبيبات	43/0,001	40/---	38/---			
التربة المتوسطة الحبيبات	40/0,002	38/0,001	35/---			
التربة الناعمة الحبيبات	38/0,003	38/0,002	32/0,001			
الأتربة الناعمة	36/0,004	34/0,003	30/0,002			
التربة الطينية عندما يبلغ المحتوى الرطوبي عند نقطة الترقيق بالنشر W_P %						
9,5-12,4	25/0,006	24/0,004	23/0,003			
12,5-15,4	24/0,021	23/0,01	22/0,007	21/0,003		
15,5-18,4	-	22/0,025	21/0,012	20/0,009	19/0,005	18/0,004
18,5-22,4	-	-	20/0,034	19/0,017	18/0,014	17/0,009
22,5-26,4	-	-	-	18,0,041	17/0,02	16/0,018
26,5-30,4	-	-	-	-	16/0,047	15/0,023

ملاحظات على الجدول (٣-٩) :

١- الترب الرملية تنتمي إلى الرمال الكوارتيزية ويجب أن لا تزيد نسبة الفلدسبار فيها عن 20 % وشوائب أخرى بنسبة 5 % .

٢- الترب الغضارية تنتمي لترب الحقب الرابع وتحتوي على رسوبيات لا تزيد نسبتها عن 5 % ودرجة الإشباع فيها $S_r > 0$.

٣- معطيات الجدول (٣-٩) لا يمكن تعميمها على الترب الغضارية التي فيها دليل القوام :

$$IL = \frac{W - IP}{W_P} > 1 \qquad (3\text{-}30)$$

تربة غرينية (تربة غضارية تحتوي على مواد عضوية) .

٥- معامل التسرب K_C ويقدر بـ (cm/s) :

$$K_C = 4.10^{-11}.\exp\frac{e}{0{,}17\,e_L - 0{,}048} \qquad (3\text{-}31)$$

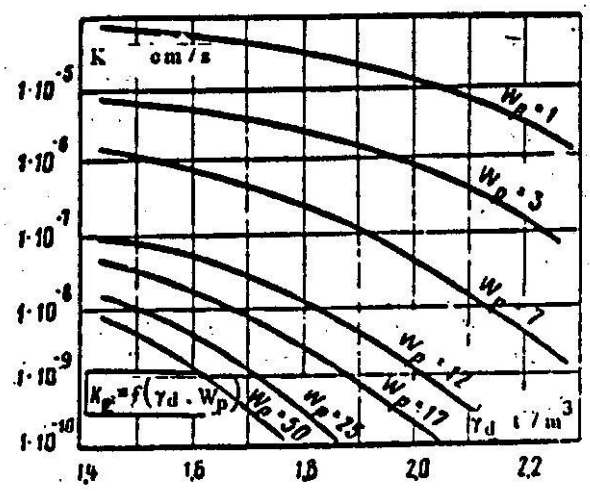
حيث e_L : معامل المسامية من أجل رطوبة حد السيلان ويعطى بالعلاقة :

$$e_L = 1{,}06\frac{\gamma_{S\ d<1mm}}{\gamma_W}.W_L \qquad (3\text{-}32)$$

γ_S : الوزن النوعي لعينة التربة الغضارية .

1,06 : ثابت تصحيح لحجم الفراغات الهوائية في التربة .

العلاقة (3-31) صحيحة إذا كان في تركيب الترب الغضارية ذرات d<1mm بنسبة (35 ÷ 40) % يمكن الاعتماد على الغرافيك شكل (٣-١٢) لإيجاد معامل التسرب K_c للترب الغضارية بناءً على قيمة W_P وقيمة(t/m^3) γ_d الوزن الحجمي الجاف .



الشكل (٣-١٢) قيم K_C للترب الغضارية

٣-٣-٢-٢ تربة جسم السد (ردمية صخرية ، بحص (GW , GP) أو رمل مع بحص (SW , SP) :

GP : بحص ذو تدرج حبي ضعيف .

GW : بحص ذو تدرج حبي جيد .

SW : رمل ذو تدرج حبي جيد .

SP : رمل ذو تدرج حبي ضعيف شريطة أن يحتوي على بحص .

المعطيات : منحني التركيب الحبي – الوزن النوعي للتربة .

يمكن من هذه المعطيات إيجاد الخواص الجيوتكنيكية التصميمية التالية :

١- الوزن الحجمي لهيكل التربة الجافة المفككة $\gamma_{d\,min}$ ويعطى بعلاقة ب-ن ماصلوف :

$$\gamma_{d\,min} = \frac{A}{(\Delta P\sqrt{K})^{0,05}} \cdot \frac{\gamma_S}{2,65} \qquad (3\text{-}33)$$

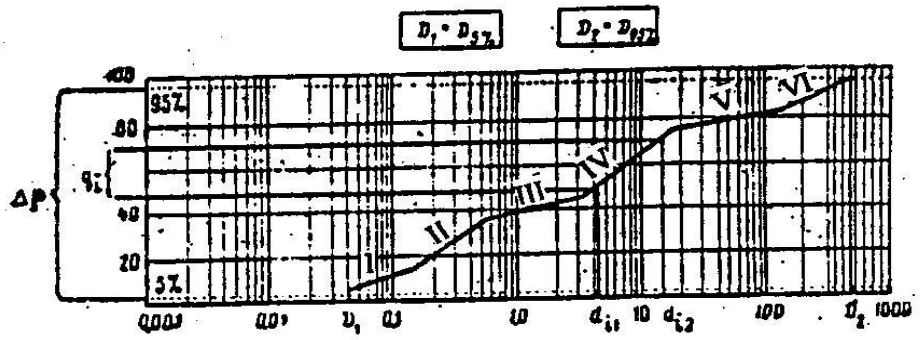
حيث A : معامل تبلغ قيمته :

$A = 1,75\ KN/m^3$ للترب الرملية .

$A = 1,86\ KN/m^3$ للفتات الصخري .

$A = 2,28\ KN/m^3$ للترب الزلطية الحصوية .

ΔP : تمثل النسبة المئوية لمحتوى الفتات المعين بالضبط في التركيب الحبي للتربة وهي الفرق بين P_2 و P_1 المتوافقة مع القيمة العظمى والصغرى لقطر الحبيبات شكل (٣-١٣) .



الشكل (٣-١٣) منحني التركيب الحبي لتربة جسم السد مقسم إلى عدة مجالات

$$\Delta P = P_2 - P_1 \qquad (3\text{-}34)$$

K : المعامل الذي يبين خواص التركيب الحبي للتربة :

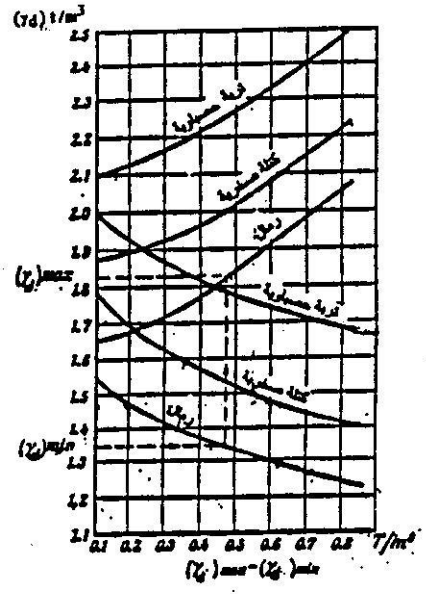
$$K = \frac{D_2 - D_1}{\Delta P \,Log\frac{D_2}{D_1}} \sum_{i=1}^{i=n} \frac{\Delta P_i}{d_{2i} - d_{1i}} Log\frac{d_{2i}}{d_{1i}} \qquad (3\text{-}35)$$

نقسم منحني التركيب الحبي لتربة جسم السد إلى عدة أقسام i وذلك لحساب قيمة K .

D_2 , D_1 : القطر الأصغري والقطر الأعظمي للحبيبات الفتاتية .

d_{2i} , d_{1i} : هي على التوالي القطر الأصغري والقطر الأعظمي للحبيبات في القسم i من منحني التركيب الحبي .

وباستخدام المنحنيات شكل (٣-١٤) يمكن إيجاد $\gamma_{d\,max}$ الوزن الحجمي الجاف للتربة بعد عملية الدحل (البنية الكثيفة للتربة وذلك بمعرفة $\gamma_{d\,min}$) .



الشكل (٣-١٤) منحنيات لتحديد قيمة $\gamma_{d\,max}$ بدلالة $\gamma_{d\,min}$ ونوع التربة

٢- تحديد قيم معامل المسامية الأعظمي والأصغري للتربة المفككة .

$$e_{max} = \frac{\gamma_S - \gamma_{dmin}}{\gamma_{dmin}} \; , \; e_{min} = \frac{\gamma_S - \gamma_{dmax}}{\gamma_{dmax}} \qquad (3\text{-}36)$$

حيث e_{min} , e_{max} : معامل المسامية المتوافق مع التربة المفككة والتربة المرصوصة وباستخدام العلاقة (3-25) :

$$I_D = \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}} \qquad (3\text{-}37)$$

يمكن إيجاد قيمة معامل المسامية الفعلي الذي يجب التوصل إليه أثناء عملية تنفيذ السد ، وذلك بمعرفة القيمة المرصوصة للمقدار I_D والذي يمكن إعطاء قيمة $I_D \geq 0{,}9$ هي معظم حالات ردم الترب المفككة .

$$e = e_{max} - I_D\,(e_{max} - e_{min}) \qquad (3\text{-}38)$$

٣- الوزن الحجمي الجاف لهيكل التربة γ_d المناظر لقيمة e والذي يجب التوصل إليه أثناء رص التربة في جسم السد .

$$\gamma_d = \frac{\gamma_S}{1+e} \qquad (3\text{-}39)$$

حيث e : معامل المسامية الفعلي الذي يجب التوصل إليه .

٤- المسامية للتربة :

$$n = \frac{e}{1+e} \qquad (3\text{-}40)$$

٥- معامل التسرب K_P للترب غير المتماسكة :

عند تطبيق قانون دارسي للرشح عبر تربة جسم السد يمكن تطبيق العلاقة للعالم الروسي "بافيجيج" لإيجاد قيمة معامل التسرب K_P (m/s) :

$$K_P = \frac{4K_{sh}}{\nu}\sqrt[3]{\eta}\ \frac{n^2}{(1-n)^2}d_{17}^2\frac{g}{1000} \qquad (3\text{-}41)$$

حيث K_{sh} : معامل شكل الحبيبات $K_{sh}=1$ للترب الرملية والحصوية

$K_{sh}= 0,34 \div 0,4$ للترب البحصية المكسرة والفتات الصخري .

ν : معامل اللزوجة الحركية للماء ($\nu = 0,15\times10^{-5}$ m^2/s عند درجة حرارة 15°) أو $\nu =$ $0,015$ cm^2/s .

d_{17} : قطر الحبيبات بالـ m المقابل للنسبة المئوية المارة % 17 من منحني التركيب الحبي للركام .

η : معامل التجانس .

n : المسامية .

g : تسارع الجاذبية (m/s^2) .

يمكن إعطاء قيم تقريبية لـ K_P لأنواع الترب المختلفة وفق الجدول (٣-١٠) .

جدول (٣-١٠)

نوع التربة	K_P (cm/s)	نوع التربة	K_P (cm/s)
غضار عادي	$10^{-9} \div 10^{-7}$	رمل ناعم	$10^{-5} \div 10^{-2}$
غضار رملي	$10^{-9} \div 10^{-7}$	رمل خشن	$10^{-2} \div 10^{-1}$
سيلت رملي	$10^{-7} \div 10^{-4}$	تربة حصوية	$10^{-1} \div 1$
		فتات صخري	$1 \div 10$

٦- زاوية الاحتكاك للترب الخشنة φ :

تتمثل مقاومة التربة بمقاومتها للقص التي يجب تقديرها بشكل صحيح من أجل التصميم والحساب الأمثل للسدود الترابية .

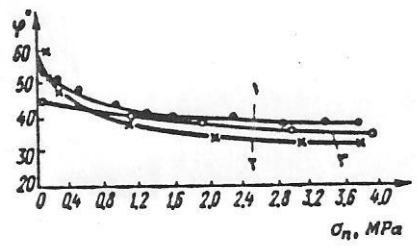
ويعبر عن مقاومة التربة بقانون "كولومب" :

$$\tau_n = \sigma_n \operatorname{tg}\varphi + C \qquad (3\text{-}42)$$

φ : زاوية الاحتكاك الداخلي . C : التماسك .

τ_n , σ_n : الإجهاد المتعامد المؤثر في مساحة القص والإجهاد المماسي الأقصى المحتمل هناك على التوالي .

لقد تبيّن بأن المقاومة تتوفر نتيجة لوجود الاحتكاك والتماسك بين حبيبات هيكل التربة . ويجب الإشارة إلى التأثير الكبير للمقدار I_D في تغير زاوية الاحتكاك الداخلي φ الذي يمكن أن يصل إلى 15° فما فوق شكل (٣-١٥) ، والى تأثير المقدار σ ناجم عن انهيار حبيبات التربة بتأثير الحمل. غالباً ما تستخدم زاوية القص Ψ وليس φ ويبين الشكل (٣-١٥) قيم زاوية الاحتكاك للزلط الخشن عند القيمة $I_D \geq 0,9$ في سد انفيرنيلو وكذلك صخور الأنديزيت .



الشكل (٣-١٥) مقاومة القص تبعاً للإجهادات المتعامدة في مستوى القص

١- الزلط لسد انفيرنيلو (يحتوي على 40 % من الحبيبات الفتاتية بقطر $d < 5$ mm

٢ كتل صخرية الأنديزيت (تحتوي على 5÷8% من الحبيبات الفتاتية التي يبلغ قطرها $d<5$mm)

٣-كتل الأحجار الكلسية (تحتوي على 12 % من الحبيبات الفتاتية التي يبلغ قطرها $d<5$ mm)

وقد اقترح الأستاذ ب. جوردينكو ، تقدير تغير زاوية القص Ψ بصورة تقريبية تبعاً للإجهادات باستخدام الصيغتين التاليتين :

$$\Psi_{\sigma n} = \Psi_0 - 5\,\mathrm{Log}\frac{\sigma_n}{\sigma_0} \qquad (3\text{-}43)$$

وللكتل الصخرية :

$$\Psi_{\sigma n} = \Psi_0 - 9\,\mathrm{Log}\frac{\sigma_n}{\sigma_0} \qquad (3\text{-}44)$$

حيث Ψ_0 : زاوية القص عند $\sigma_3 \rightarrow 0$ (الإجهاد الرئيسي الأصغر للانضغاط) والتي تقابل الإجهاد $\sigma_0 = 0,2$ Mpa .

σ_n : الإجهاد الناظمي على سطح الانهيار ويعطى مخبرياً بالعلاقة :

$$\sigma_n = \frac{2\sigma_1 \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3} \qquad (3\text{-}45)$$

ويمكن إيجاد قيمة $\sigma_{n\,max}$ في السدود الترابية :

$$\sigma_n = \gamma_{max} (H + Z) \qquad (3\text{-}46)$$

H : ارتفاع جسم السد .

Z : سماكة الأساس .

γ_{max} : الوزن الحجمي الجاف الأعظمي لترب السد أو الأساس .

نلاحظ من العلاقة (3-44) بأن الكتلة الصخرية تسلك في حالة القيم المرتفعة للمقدار σ_n ، سلوكاً أسوأ من سلوكها في حالة التربة الزلطية الحصوية .

إن تقييم تأثير كثافة تربة الردم الخشنة للحبيبات ، يمكن أن يتم باستخدام العلاقة التي وضعها الأستاذ ل.ن. رسكازوف .

$$\psi_0 = \theta + a\, I_D^K \qquad (3\text{-}47)$$

حيث θ : زاوية القص عند $I_D \to 0$.

a , K : ثوابت تجريبية .

استناداً إلى المعطيات المخبرية والميدانية نجد بأن بارامترات العلاقة (3-47) تعتمد على نوع التربة ويمكن لأجل التقديرات الأولية أن تؤخذ قيمتها من الجدول (٣-١١) . إن القيم القصوى للزاوية Ψ_0 لا تزيد عادةً في الصخور عن 53° وفي التربة الزلطية الحصوية عن $\Psi_0 = 51^\circ$.

جدول (٣-١١) قيم θ , a , K مع اعتبار $I_D = 0,9$ في السدود العالية والمتوسطة

البارامترات	نوع التربة	
	حصوية زلطية	فتات صخرية
θ	$38 \div 41^\circ$	$40 \div 45^\circ$
a	$7 \div 10^\circ$	$8 \div 12^\circ$
K	0,8 ÷ 1	0,4 ÷ 0,7

التسرب في السدود الترابية

٤-١- وصف عام لمفهوم التسرب في السدود الترابية :

يحصل التسرب تحت المنشأة أو بداخلها أو في مكان اتصالها مع الجوانب تحت تأثير الضاغط الحاصل عن الاختلاف في منسوب الماء أمام وخلف المنشأة . من المعروف بأن سرعة التسرب عبر وسط ترابي تتبع إلى معامل النفاذية فكلما ازدادت قيمته كلما ازدادت قيمة كمية التسرب وبالتالي القوى الناجمة عنها كقوة الضغط الشاقولي ، وقوى الارتشاح الحجمية (القوى الهيدروديناميكية) التي تحاول تحريك التربة في اتجاه حركة الماء ، مما يؤدي إلى إضعافها وزيادة معامل نفاذيتها .

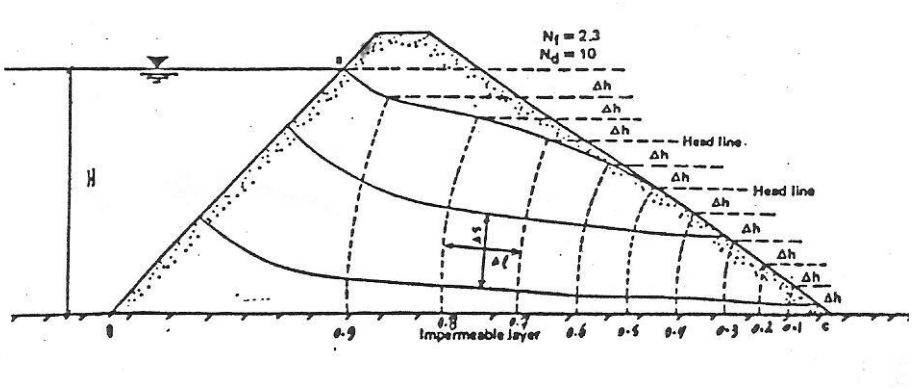
عندما تكون المنشأة مؤلفة من تربة نفوذة (سد ترابي) فإن تيار التسرب فيها يصبح غير مضغوط . أي يصبح سطح الماء لهذا التيار حراً ، ويدعى السطح العلوي في المقطع العرضي للسد بخط الإشباع .

إن مسألة دراسة التسرب في السدود الترابية ضرورية جداً لما للتسرب من تأثير على استقرار الوجه الخلفي للسد وعلى توازن المنشأة بشكلٍ عام .

٤-٢- تعيين عناصر التسرب – السرعة – التدارج – التدفق :

إن مسألة حساب التسرب في السدود الترابية تتلخص في تحديد موضع منحني (خط) الإشباع) ، وتحديد تصريف الماء المتسرب وسرعة وتدارج الضغط (العلو الهيدروليكي) في أي نقطة من نقاط منطقة التسرب . ولم يتم التوصل إلى حلول هيدروديناميكية دقيقة لمسائل التسرب في معظم حالات التطبيقات العملية لتصميم السدود الترابية الطرق التصميمية الهيدروليكية التي تمّ وضعها من قبل العالم ن.ن بافلوفسكي التي تساعد في رسم خط الإشباع وتحديد كمية التدفق المتسرب .

بالحصول على منحني خط الإشباع يتم رسم شبكة الجريان باستخدام خاصية التعامد بين خطوط التيار وخطوط الكمون (خطوط تساوي الضغط) كما في الشكل (٤-١) .



الشكل (٤-١) الشبكة الهيدروديناميكية في السد الترابي

لنأخذ عنصراً من عناصر الشبكة طوله $\Delta\ell$ وارتفاعه ΔS ولنحسب عناصر التسرب من قانون "دارسي" :

$$V = K \cdot I \qquad (4\text{-}1)$$

حيث I : تدارج الضغط ويعطى بالعلاقة :

$$I = \frac{\Delta h}{\Delta \ell} \qquad (4\text{-}2)$$

K : معامل النفاذية لتربة جسم السد .

Δh : فرق الضغط بين بداية العنصر ونهايته .

$$\Delta h = \frac{H}{n} \qquad (4\text{-}3)$$

n : عدد خطوط الكمون ، وبشكلٍ عام n = 10 شكل (٤-١) وبالتالي :

$$\Delta h = 0{,}1\ H \qquad (4\text{-}4)$$

H : فرق الضغط أمام المنشأة وخلفها .

التدفق في واحدة الطول من المنشأة يعطى بالعلاقة :

$$\Delta q = V \cdot \Delta S \qquad (4\text{-}5)$$

$$\Delta q = K.I.\Delta S = K.\frac{\Delta h}{\Delta \ell}.\Delta S \qquad (4\text{-}6)$$

ومنه يكون :

$$q = \sum_{0}^{m} K.\Delta h \frac{\Delta S}{\Delta \ell}$$

$$q = K.\frac{H}{n}\left(\frac{\Delta S_1}{\Delta \ell_1} + ... + \frac{\Delta S_m}{\Delta \ell_m}\right) \qquad (4\text{-}7)$$

عندما تكون الشبكة مربعة $\Delta S = \Delta \ell$ ومنه :

$$q = K.\frac{H}{n}m \quad (m^3/s.m`) \qquad (4\text{-}8)$$

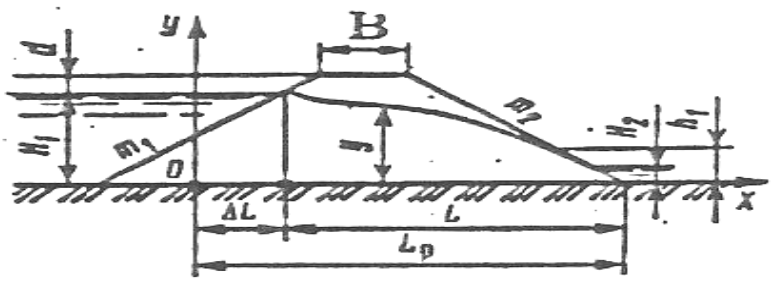
حيث m : عدد قنوات الانسياب للماء المتسرب (شرائط التصريف) .

n : عدد قنوات تساوي الكمون (عدد خطوط تساوي الضغط) .

٤-٣- الطريقة الهيدروليكية (طريقة بافلوفسكي) في دراسة التسرب في السدود الترابية :

٤-٣-١- دراسة التسرب في سد ترابي متجانس على أساس كتيم شكل(٤-٢)

تتم دراسة التسرب وفق الخطوات التالية :



الشكل (٤-٢) مقطع في سد ترابي متجانس على أساس كتيم يبين موضع خط الإشباع

١- حساب h_1 : ارتفاع نقطة خروج خط الإشباع على المنحدر الخلفي عن القاعدة ويعطى بالعلاقة :

$$h_1 = \frac{L_P}{m_2} - \sqrt{\left(\frac{L_P}{m_2}\right)^2 - (H_1 - H_2)^2} + H_2 \qquad (4\text{-}9)$$

m_2 , m_1 : ميل المنحدر الأمامي والخلفي على التوالي .

H_2 , H_1 : ارتفاع الماء أمام المنشأة وخلفها .

L_P : العرض المكافئ للسد عند القاعدة ويعطى بالعلاقة :

$$L_P = \Delta L + L \qquad (4\text{-}10)$$

$$L = m_1 d + B + m_2 (H_1 + d) \qquad (4\text{-}11)$$

$$\Delta L = \beta \, . \, H_1 \qquad (4\text{-}12)$$

ΔL : بعد محور الإحداثيات OY عن الشاقول المار من نقطة تقاطع منسوب الماء في البحيرة مع المنحدر الأمامي .

β : معامل يعين بالعلاقة التالية :

$$\beta = \frac{m_1}{2m_1 + 1} \qquad (4\text{-}13)$$

عندما $m_1 \geq 2$ فإن $\beta = 0{,}4$.

٢- حساب مقدار التدفق عبر السد q_T يعطى بالعلاقة التالية :

$$q_T = K_T \frac{H_1^2 - h_1^2}{2(L_P - m_2 h_1)} \qquad (4\text{-}14)$$

K_T : معامل النفاذية لتربة جسم السد .

٣- رسم منحني خط الإشباع :

يتم رسم خط الإشباع وفق علاقة "ديبويه" التالية :

$$y = \sqrt{H_1^2 - \frac{2q_T . x}{K_T}} \qquad (4\text{-}15)$$

وذلك بإعطاء أكثر من ستة قيم لـ x اعتباراً من $x = \Delta L$ وحتى القيمة $x = L_P - m_2 h_1$.

٤- سرعة التسرب عند مخرج خط الإشباع على الوجه الخلفي للسد تعطى بالعلاقة :

$$V_B = K_T . I_B \qquad (4\text{-}16)$$

I_B : تدارج الضغط عند المخرج .

$$I_B = \frac{\Delta y}{\Delta x} \qquad (4\text{-}17)$$

حيث :

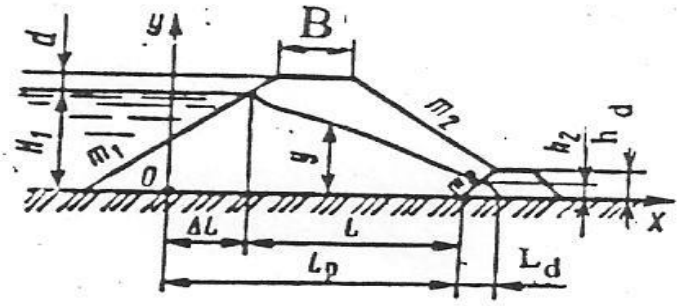
Δy : مقدار انخفاض الضغط في الجزء الأخير من خط الإشباع .

Δx : الفرق بين فواصل آخر نقطتين على منحني خط الإشباع .

ملاحظة : عندما لا يوجد ماء خلف السد يكون $H_2 = 0$.

٤-٣-٢- دراسة التسرب في سد ترابي متجانس مع موشور صرف وعلى أساس كتيم

شكل (٤-٣) :



الشكل (٤-٣)خط الإشباع في سد ترابي متجانس مع موشور صرف وعلى أساس كتيم

خطوات الدراسة :

١- حساب مقدار تدفق التسرب q_T (m^3/s) أو (m^3/day) :

$$q_T = K_T \frac{H_1^2 - H_2^2}{2(L_P + L_d)} \qquad (4\text{-}18)$$

حيث L_d : بعد نقطة خروج خط الإشباع عن بداية موشور الصرف ويمكن إهمال قيمتها أو حسابها من العلاقات التالية :

$$L_d = (0{,}05 \div 0{,}06) H_1 \;,\; L_d = \frac{m_3 H_2}{3} \qquad (4\text{-}19)$$

حيث m_3 ميل المنحدر الأمامي لموشور الصرف .

$$L_P = \Delta L + L$$

$$L_P = \beta H_1 + m_1 d + B + m_2 (H_1 + d - h_d) - m_3 h_d \qquad (4\text{-}20)$$

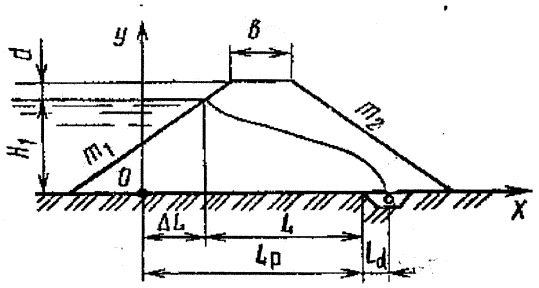
٢- إيجاد ارتفاع نقطة التقاء خط الإشباع مع منحدر موشور الصرف h_2 :

$$h_2 = \frac{q_T}{K_T} \qquad (4\text{-}21)$$

٣- رسم منحني خط الإشباع وفق علاقة "ديبويه" (4-15) وذلك بإعطاء قيم لـ x من $x = \Delta L \div L_P$ وبعد ذلك يتم الوصل مع النقطة التي ترتيبها h_2 مع موشور الصرف .

٤-٣-٣- دراسة التسرب في السدود الترابية المتجانسة مع أنبوب صرف عند القاعدة وعلى

أساس كتيم شكل (٤-٤) :



الشكل (٤-٤)سد ترابي متجانس مع أنبوب صرف عند القاعدة وعلى أساس كتيم

خطوات الدراسة :

نعتبر بأنه لا يوجد ماء خلف السد أي $H_2 = 0$. ومعادلة التدفق تكتب على الشكل التالي :

$$q_T = K_T \frac{H_1^2}{2L_P} \qquad (4\text{-}22)$$

$$L_P = \Delta L + L$$

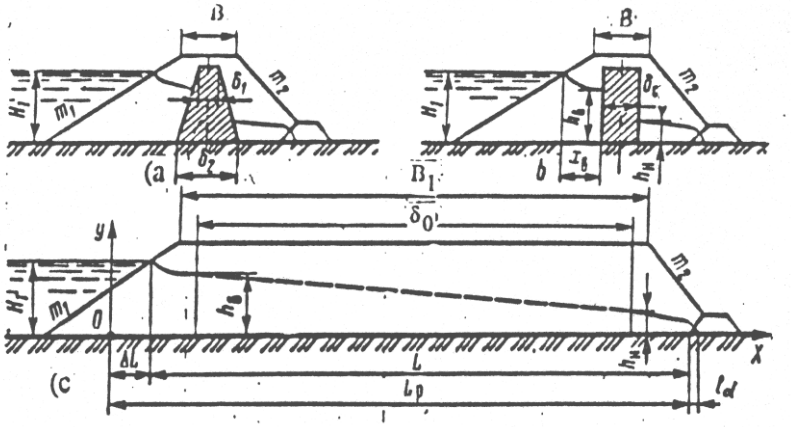
$$L_P = \beta H_1 + m_1 d + B + m_2 (H_1 + d) - L_S \qquad (4\text{-}23)$$

L_S : بعد الأنبوب عن نهاية السد .

رسم خط الإشباع يتم وفق علاقة " ديبويه " .

٤-٣-٤- دراسة التسرب في سد ترابي مع نواة مركزية على أساس كتيم

شكل (٤-٥) :



الشكل (٤-٥) مخطط دراسة التسرب في سد ترابي مع نواة مركزية

a) المقطع الأساسي ، b) مقطع السد مع النواة بعرض وسطي δ_c ، c) مقطع السد مع النواة بعرض افتراضي δ_0

دراسة التسرب في السدود الترابية المتجانسة مع نواة بالاعتماد على طريقة الافتراض وذلك

باستبدال الجدار الجوفي للسد بطبقة ترابية افتراضية ذات معامل نفاذية تربة جسم السد .

خطوات الحل :

١- نوجد السماكة الوسطية للنواة :

$$\delta_c = \frac{\delta_1 + \delta_2}{2} \qquad (4\text{-}24)$$

حيث δ_1 , δ_2 : عرض النواة من الأعلى والأسفل على التوالي .

٢- نحدد عرض الطبقة الافتراضية .

$$\delta_0 = \delta_c \frac{K_T}{K_c} \qquad (4\text{-}25)$$

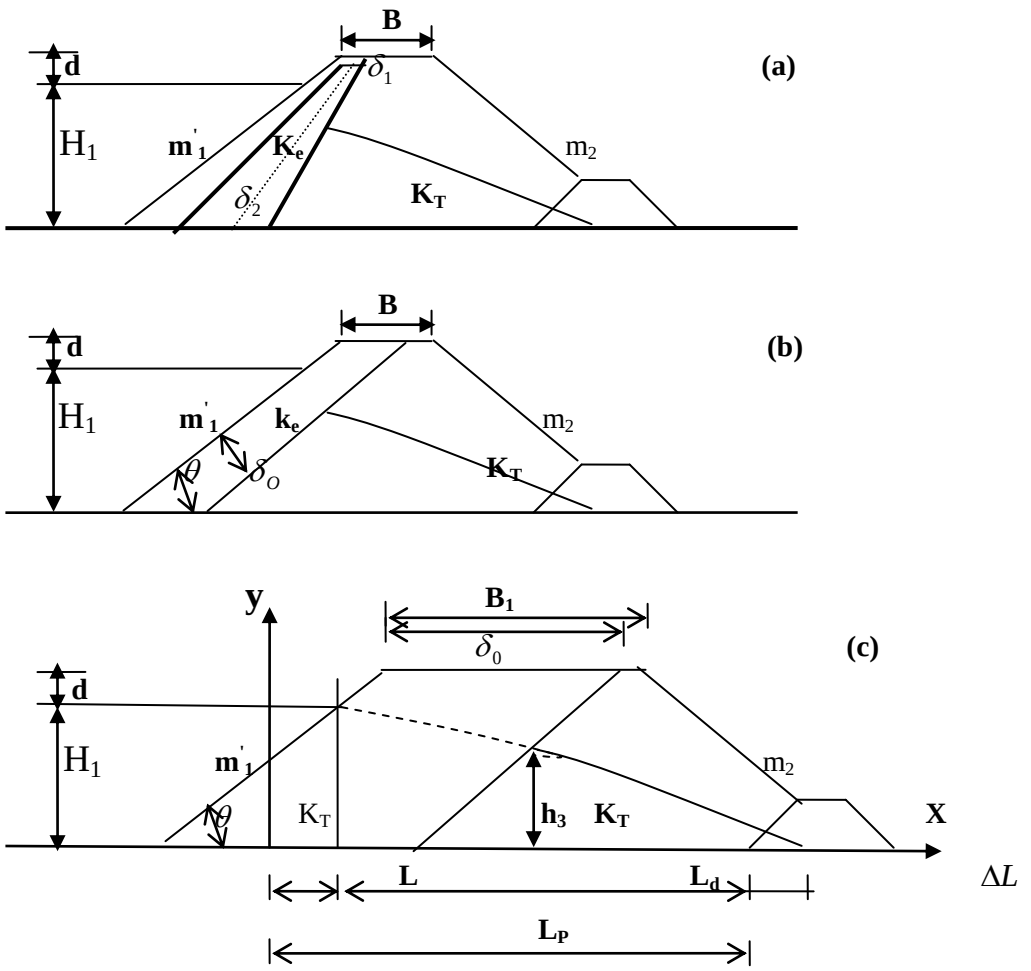
حيث K_T : معامل النفاذية لتربة جسم السد ، K_c معامل النفاذية لتربة النواة ،δ_c العرض الوسطي ، δ_0 العرض الافتراضي .

٣- نرسم شكل السد بعد التعويض عن عرض القمة بما يعادلها .

$$B_1 = B + \delta_0 - \delta_c \qquad (4\text{-}26)$$

بذلك نحصل على سد ترابي على أساس كتيم بدون موشور صرف أو مع الموشور ويتم الحساب برسم خط الإشباع وحساب التدفق كما في الحالة (٤-٣-١) أو في الحالة (٤-٣-٢) يتم رسم منحني الارتشاح فقط في الأجزاء من السد قبل وبعد النواة وذلك بإعطاء قيم لـ x من $x = \Delta L \div X_B$ وفق $x = X_B + \delta_0 \div L_P$ للرسم بشكل نهائي يتم تحديد قيمة h_B , h_H من الشكل (c) ومن ثم يتم نقل هذه القيم إلى السد الأساسي .

٤-٣-٥ دراسة التسرب في سد ترابي مع شاشة على أساس كتيم شكل (٤-٦)



الشكل (٤-٦) سد ترابي مع شاشة على أساس كتيم

خطوات الحل :

١- نوجد العرض الوسطي δ_C :

$$\delta_C = \frac{\delta_1 + \delta_2}{2} \qquad (4\text{-}27)$$

ونرسم السد بميل منحدر أمامي m'_1 كما في الشكل (b) حيث $m'_1 = \cot\theta$.

٢- نوجد العرض المكافئ للشاشة .

$$\delta_0 = \delta_C \frac{K_T}{K_e . \sin\theta} \qquad (4\text{-}28)$$

K_e : معامل نفاذية تربة الشاشة .

θ : زاوية محور الشاشة بالنسبة للقاعدة .

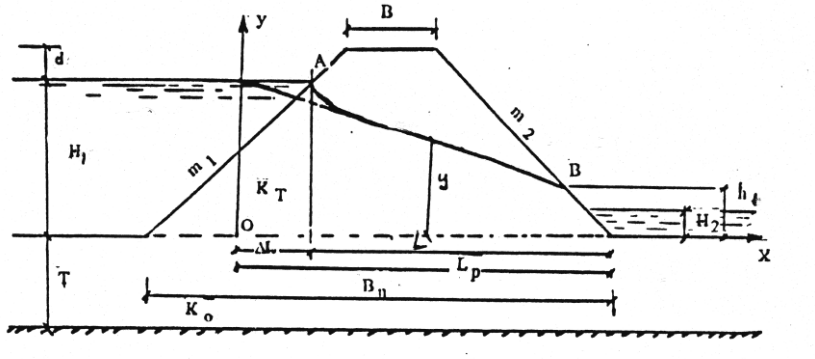
٣- نوجد العرض النهائي للسد عند القمة B_1 :

$$B_1 = B + \delta_0 - \delta_C \qquad (4\text{-}29)$$

4- نجري حساب الرشح في سد ترابي متجانس حالة (٤-٣-١) أو حالة (٤-٣-٢) بحالة وجود موشور صرف وذلك بعد التعويض عن m_1 بـ m_1' . وبعد ذلك يتم رسم خط الإشباع بعد الشاشة وذلك من خلال الرسم على ورقة مليمترية ونقل الارتفاعات للسد الأساسي .

٤-٣-٦-دراسة التسرب في سد ترابي متجانس على أساس غير كتيم شكل (٤-٧) :

يدرس التسرب عبر هذا السد حسب طريقة " بافلوفسكي " حيث يتم رسم منحني الإشباع باعتبار أن السد يرتكز على أساس كتيم حالة (٤-٣-١) وحساب التدفق عبر السد وكأنه على قاعدة كتيمة ثم نحسب التدفق عبر الأساس فيكون التدفق الكلي هو مجموع التدفقين :



الشكل (٤-٧) رسم تخطيطي لسد ترابي على أساس غير كتيم

$$q = q_T + q_0 \qquad (4\text{-}30)$$

حيث q_T : التدفق عبر السد ويعطى بالعلاقة (4-14) .

q_0 : التدفق عبر الأساس ويعطى بالعلاقة :

$$q_0 = K_0 T \frac{H_1 - H_2}{n B_n} \qquad (4\text{-}31)$$

حيث K_0 : معامل النفاذية لتربة الأساس .

T : سماكة طبقة الأساس النفوذة .

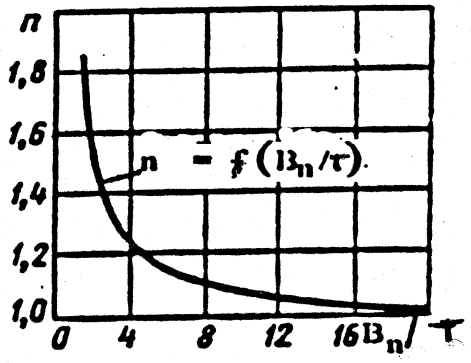
B_n : عرض قاعدة السد السفلية .

n : معامل التصحيح ويحدد من المنحني شكل (٤-٨) تبعاً لقيم B_n/T أو من الجدول (٤-١) .

جدول (٤-١) قيم n تبعاً لـ B_n/T

Bn/T	20	5	4	3	2	1

n	1,15	1,18	1,23	1,3	1,44	1,87



الشكل (٤-٨) غرافيك لإيجاد قيم $n = f\,(B_n/T)$

وفي حالة وجود طبقات عدة في الأساس مختلفة بقيم K_0 تؤخذ قيمة معامل النفاذية K_0 كما يلي :

$$K_0 = \sqrt{K_{max} . K_{min}} \qquad (4\text{-}32)$$

$$K_{max} = \frac{\sum_{i=1}^{m} K_i T_i}{\sum_{i=1}^{m} T_i} \;,\; K_{min} = \frac{\sum_{i=1}^{m} T_i}{\sum_{i=1}^{m} (T_i / K_i)} \qquad (4\text{-}33)$$

حيث K_i : معامل النفاذية للطبقة i .

T_i : سماكة الطبقة i .

يتم رسم منحني الإشباع وفق علاقة "ديبويه" (4-15) .

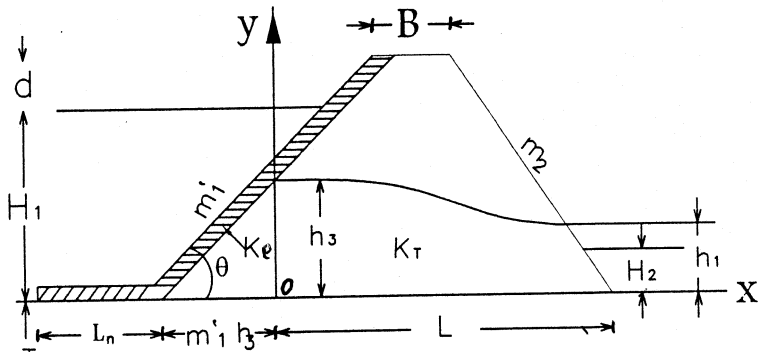
٤-٣-٧- دراسة التسرب في السدود الترابية مع شاشة مانعة وحصيرة وعلى أساس غير كتيم شكل (٤-٩) :

خطوات الدراسة :

١- نحدد قيمة h_3 وذلك بطريقة التجريب المتتالي :

$$\frac{K_0 T (H_1 - h_3)}{n (L_n + m_1' h_3)} = \frac{h_3 - H_1}{L} \left(K_0 T + K_T \frac{h_3 + H_1}{2} \right) \qquad (4\text{-}34)$$

n : معامل التصحيح التابع للنسبة B_n / T .



الشكل (٤-٩) سد ترابي مع شاشة مانعة وحصيرة وعلى أساس غير كتيم

B_n تعطى بالعلاقة :

$$B_n = L_n + m_1'(H_1 + d) + B + m_2(H_1 + d) \qquad (4\text{-}35)$$

$$L = m_1'(H_1 + d - h_3) + B + m_2(H_1 + d) \qquad (4\text{-}36)$$

٢- نحسب h_1 ارتفاع نقطة خروج منحني الإشباع على المنحدر الخلفي عن القاعدة :

$$h_1 = \frac{L}{m_2} - \sqrt{\left(\frac{L}{m_2}\right)^2 - (h_3 - H_2)^2} + H_2 \qquad (4\text{-}37)$$

٣- نحسب q التدفق عبر السد والأساس معاً :

$$q = K_0 T \frac{H_1 - h_3}{n(L_n + m_1' h_3)} \qquad (4\text{-}38)$$

٤- نحسب q_T التدفق عبر السد فقط :

$$q_T = K_T \frac{h_3^2 - h_1^2}{2(L + m_2 h_1)} \qquad (4\text{-}39)$$

٥- نرسم منحني الإشباع وفق العلاقة :

$$y = \sqrt{h_3^2 - \frac{2 q_T x}{K_T}} \qquad (4\text{-}40)$$

قيم x تتحول من $x = 0$ حتى $x = L - m_2 h_1$.

٦- نحسب السرعة عند نقطة الخروج V_B :

$$V_B = K_T \cdot I_B \qquad (4\text{-}41)$$

$$I_B = \frac{\Delta y}{\Delta x} \qquad (4\text{-}42)$$

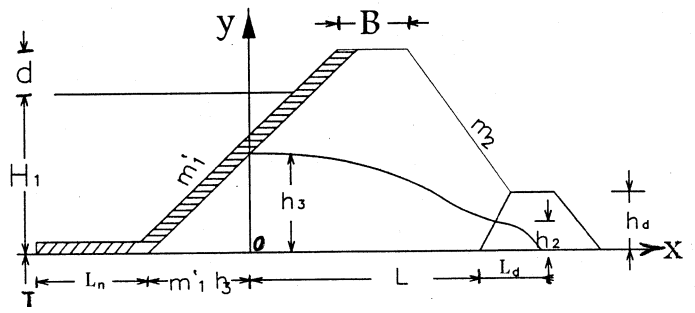
Δx : تأخذ قيم من (2 ÷ 0,5) m .

٤-٣-٨- دراسة التسرب في السدود الترابية مع شاشة مانعة وحصيرة وموشور صرف وعلى أساس غير كتيم شكل (٤-١٠) :

خطوات الدراسة :

١- كما في الحالة السابقة نوجد h_3 من المعادلة (4-34) وذلك بفرض قيم لـ h_3 ونحسب L من العلاقة :

$$L = m_1' (H_1 + d - h_3) + B + m_2 (H_1 + d - h_d) - m_3 h_d \quad (4\text{-}43)$$



الشكل (٤-١٠) سد ترابي مع شاشة مانعة وحصيرة وموشور صرف وعلى أساس غير كتيم

٢- نحسب h_2 ارتفاع نقطة خروج خط الإشباع مع موشور الصرف بعد ذلك نعوض في (4-34) حتى نحصل على مطابقة بين طرفي المعادلة (4-34) :

$$h_2 = \sqrt{L^2 + (h_3 - H_2)^2} - L + H_2 \quad (4\text{-}44)$$

H_2 : ارتفاع الماء خلف السد .

٣- نحسب التدفق الكلي وفق العلاقة :

$$q = K_0 T \frac{H_1 - h_3}{n (L_n + m_1' h_3)} \quad (4\text{-}45)$$

٤- يحسب التدفق عبر السد :

$$q_T = K_T \frac{h_3^2 - h_2^2}{2L} \quad (4\text{-}46)$$

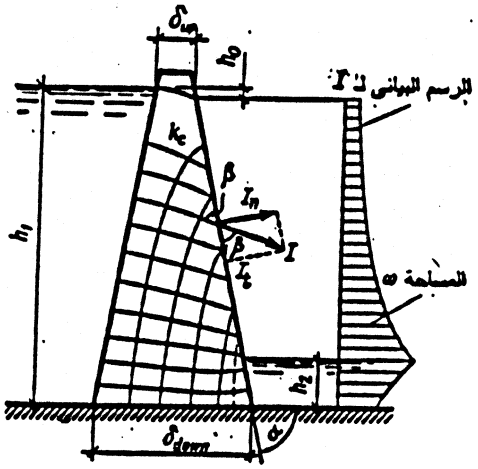
٥- يرسم خط الإشباع وفق علاقة ديبويه :

$$y = \sqrt{h_3^2 - \frac{2 q_T x}{K_T}} \quad (4\text{-}47)$$

وذلك بإعطاء قيم لـ x من x = 0 وحتى x = L .

٤-٣-٩ دراسة التسرب في السدود الركامية مع نواة كتيمة على أساس كتيم :

في السدود الركامية التي فيها $\frac{K_T}{K_c} > 50$ يتم دراسة التسرب فقط في النواة شكل (٤-١١) ، أي رسم خط الإشباع وحساب التدفق . يتم ذلك وفق الخطوات التالية :



شكل (٤-١١) الجدار الجوفي (نواة) لسد ركامي مشيد على أساس صخري

عندما $\delta_d < 0,5\ h_1$ أي عرض النواة من الأسفل أصغر من نصف قيمة عمق الماء أمام الجدار الجوفي فإن مقدار تخفيض خط الإشباع يساوي ما يلي :

$$h_0 = 0,65\frac{\delta_u}{1-tg\left(\frac{\pi}{2}-\alpha\right)} \qquad (4\text{-}48)$$

حيث δ_u : عرض النواة من الأعلى .

α : زاوية ميل جدار النواة مع الأفق .

h_0 : مقدار تخفيض خط الإشباع عن منسوب الماء أمام النواة .

بعد تحديد قيمة h_0 يتم رسم شبكة التسرب في جسم النواة بشكل تقريبي بالاعتماد على خط الإشباع وتحقيق شرط التعامد بين خطوط الكمون وخطوط التيار .

ويتم حساب تدارج الضغط عند مخرج كل خط تيار على جدار النواة وذلك بالعلاقة :

$$I = \frac{\sin\alpha}{\cos\beta} \qquad (4\text{-}49)$$

β : الزاوية المحصورة بين المماس لخط التيار ووجه النواة ويتم قياسها هندسياً .

بعد إيجاد قيم I يتم رسم مخطط تدارج الضغط بمقياس رسم معين ومنه نحسب مساحة المخطط .

قيمة تدفق الرشح q تعطى بالعلاقة :

$$q = K_c \cdot \omega \qquad (4\text{-}50)$$

K_c : معامل نفاذية تربة النواة .

ω : مساحة مخطط تدارج الضغط بعد ضربها بمقياس الرسم .