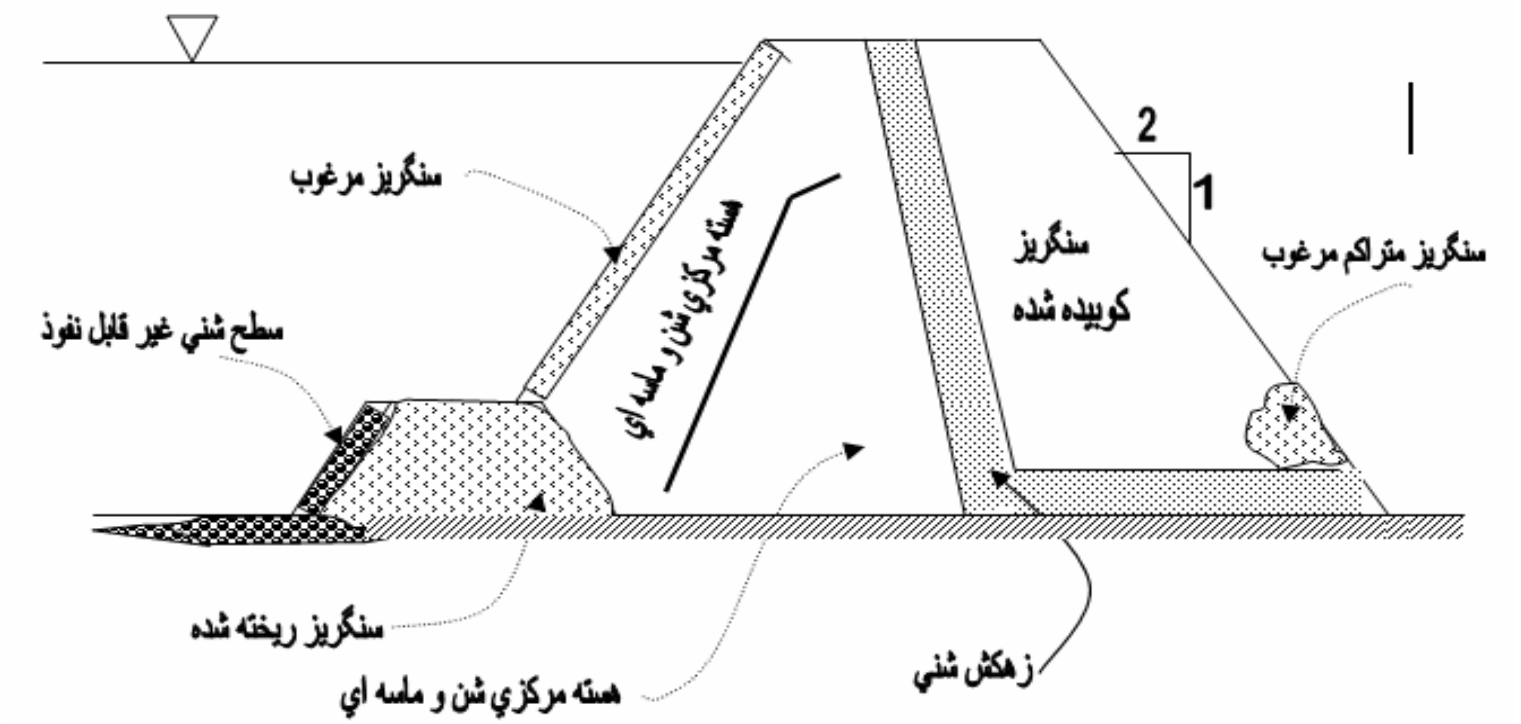
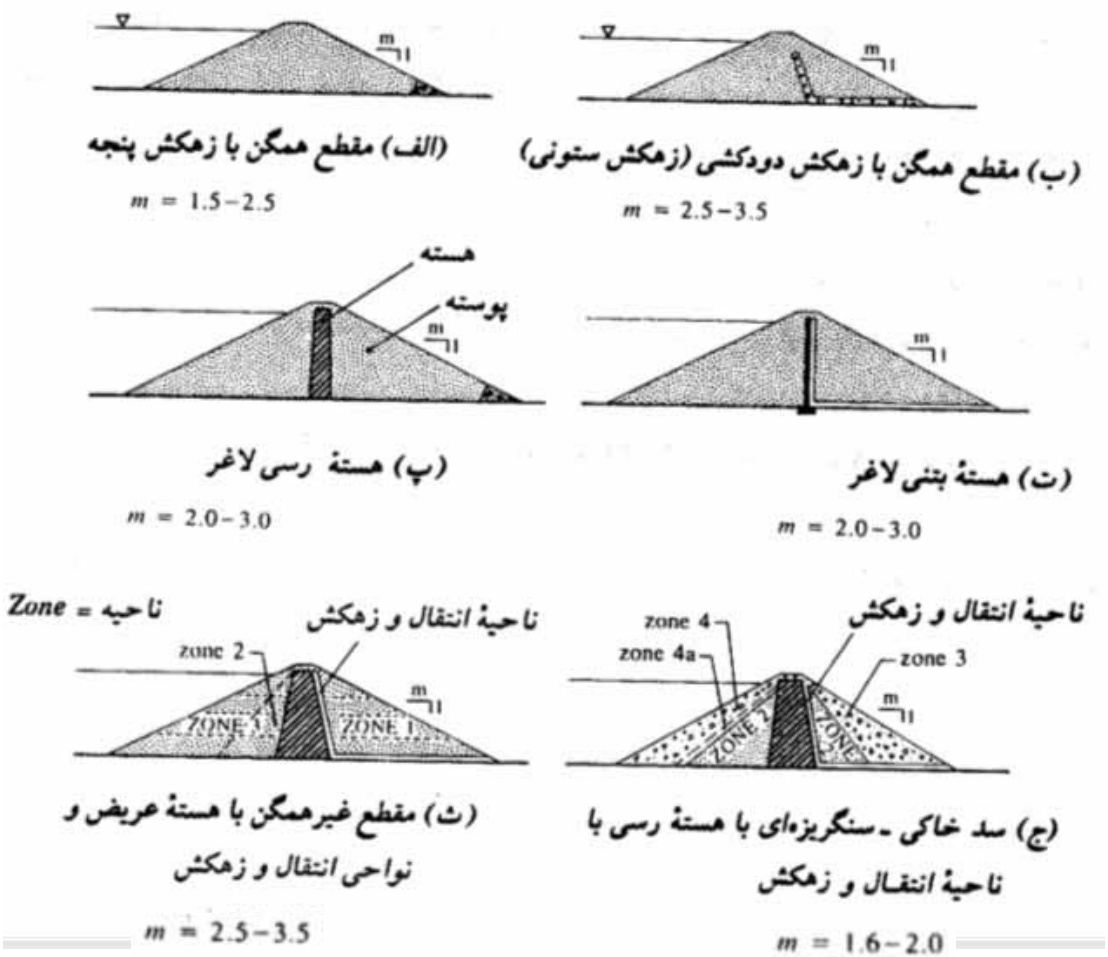
# انتخاب شکل سد خاکی

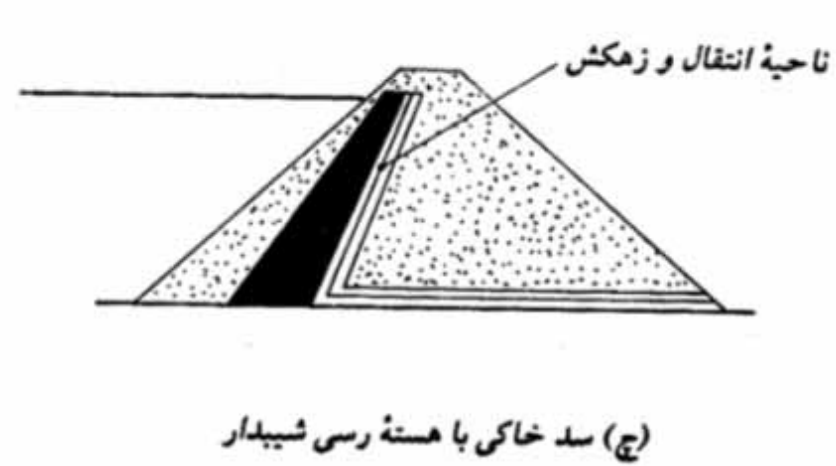
- یک سد خاکی ممکن است دارای مقطع یک قسمتی ( همگن ) بایک زهکش داخلی باشد که معمولاً بصورت زهکش دودکشی ، عمودی و یا مایل است . شکل کلی مقطع ممکن است دو قسمتی باشد



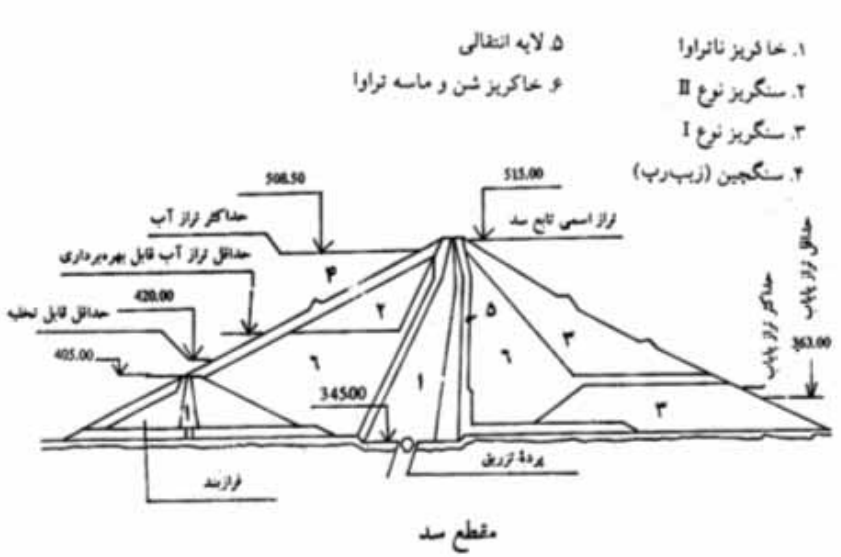
# مقاطع تیپ سدهای خاکی روی پی نفوذ ناپذیر



# مقاطع تیپ سدهای خاکی روی پی نفوذ ناپذیر

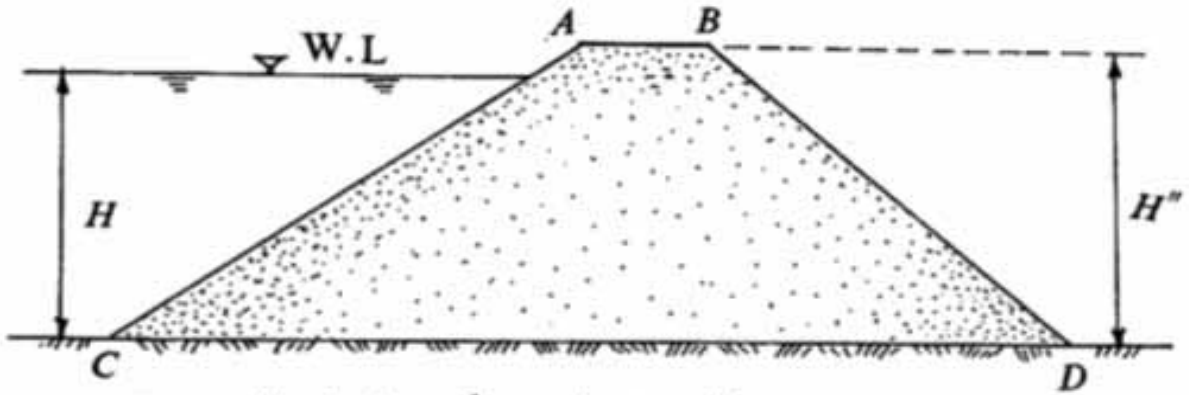



(ج) سد خاکی با هستهٔ رسی شیبدار

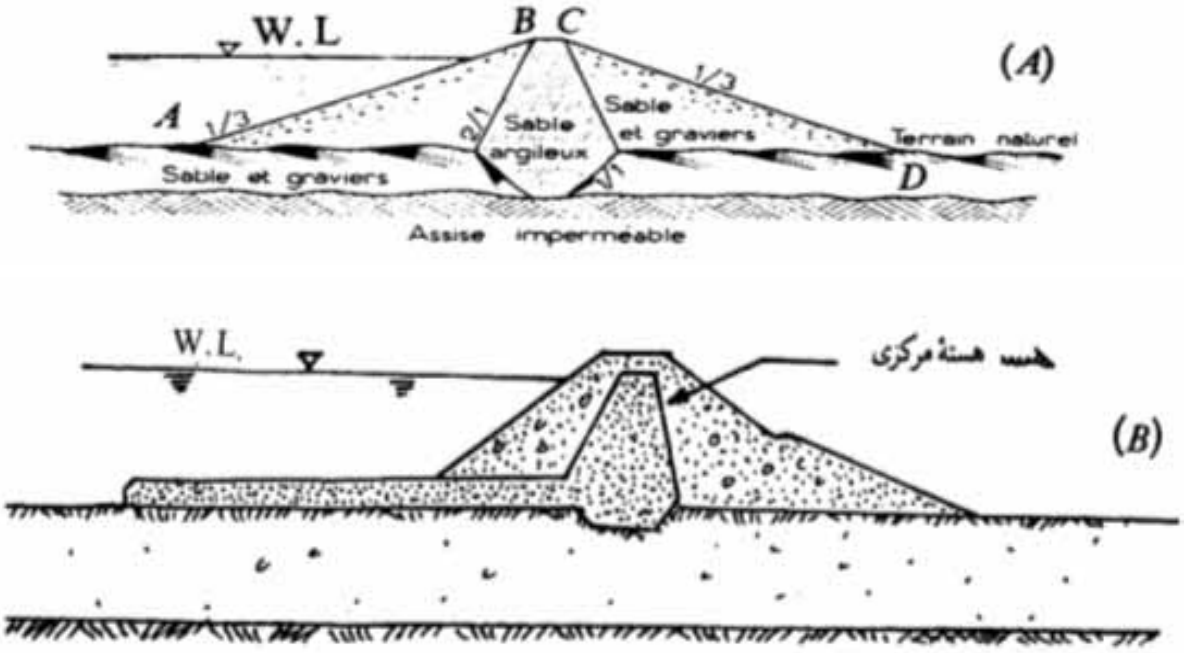



مقطع سد

سد مخزنی مارون در ۱۹ کیلومتری شمالشرقی بهبهان بر روی رود-خانه مارون در استان خوزستان




مقطع عرضی ازسد خاکی درامتداد طولی رودخانه




مقطع عرضی ازسد خاکی با دونوع هستهٔ مرکزی

# گونه های مختلف از دیدگاه همگنی بدنه سد

- **۱ ـ نوع همگن :** نوع همگن به سدی گفته میشود که تمام بدنه آن از یک نوع مصالح ساخته می شود . در این نوع سد ، چون قسمت عمده سد ، از زه اشباع می شود و دامنه پایاب نیز تحت تأثیر زه می باشد ، لازم است که شیب دامنه ها خیلی کم گرفته شود تا دامنه پایاب در برابر زه و دامنه سراب در یک تخلیه سریع مقاوم باشد
- اگر در این نوع سدها هیچ گونه تکنیک زهکشی به کار برده نشود ممکن است دامنه پائین دست در اثر زه اشباع شود از این رو قرار دادن زهکش افقی یا پنجه سنگی در پایاب ، و ایجاد پوشش بالا دست در بستر مخزن ورودی دامنه بالادست از روشهایی هستند که به منظور کنترل زه و پایداری بیشتر سد بکار برده می شوند

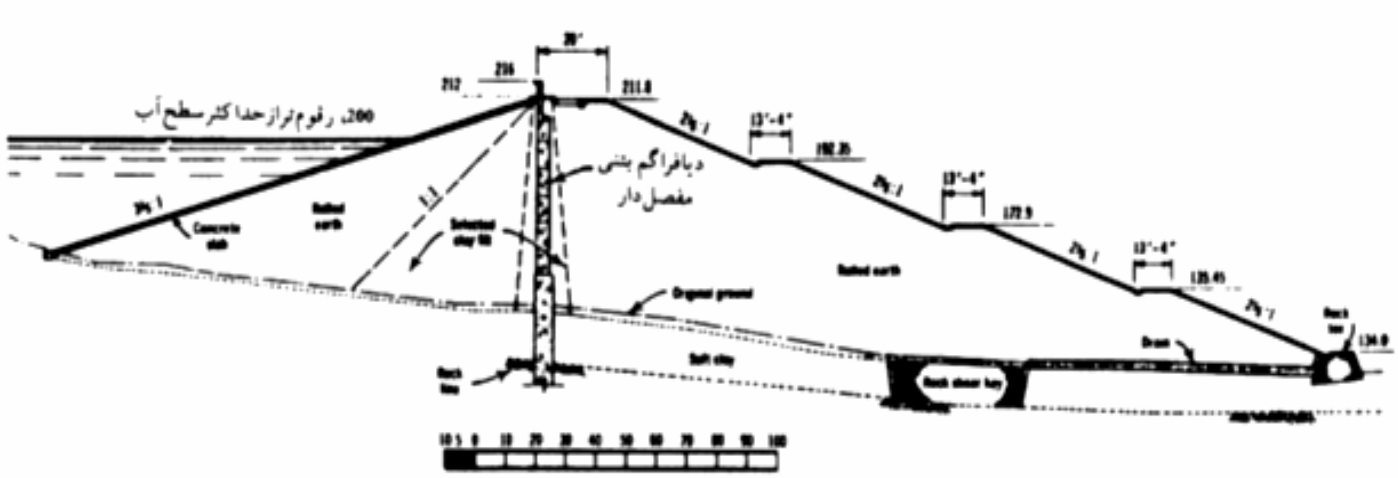
# گونه های مختلف از دیدگاه همگنی بدنه سد

- **۲ ـ نوع مطبق:** نوع مطبق ( یا مغزه دار ) از معمولی ترین نوع سدهای خاکی است . در این نوع ، نقش آب بندی سد بعنوان مخزن به عهده مغزه است و نقش استحکام و پایداری را عمدتاً پوسته سد ایفا می کند . پوسته پائین دست علاوه بر استحکام ، نقش زهکش را نیز دارد
- حداقل عرض قاعده مغزه باید برابر ارتفاع سد باشد چنانچه این عرض از ارتفاع کوچکتر باشد بعنوان تیپ دیافراگمی تلقی می گردد . همچنین اگر عرض قاعده از حد معینی بزرگتر باشد سد به نوع همگن تبدیل می شود
- ارتفاع مغزه ترجیحاً باید به تاج سد برسد و در صورتی که از این حد کمتر است ، لازم است تا آن حد باشد که سد از خطر سیفون مویینی مصون باشد ، زیرا آب مویینی به علت کشش سطحی به سمت بالا حرکت می کند و در شرایطی ممکن است در بخش دیگری به سمت پائین جریان یابد

# گونه های مختلف از دیدگاه همگنی بدنه سد

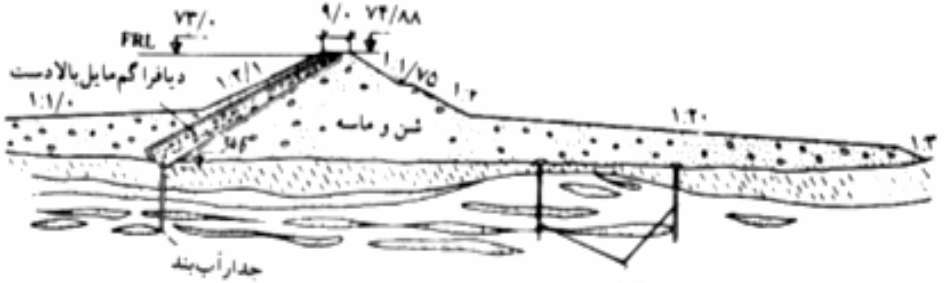
- **۳ ـ نوع دیافراگمی :** در این نوع سد ، تمام بدنه از مواد درشت دانه یا مخلوط ساخته می شود و فقط بخشی که نقش آب بند را دارد بصورت دیوار یا پرده غیر قابل نفوذ در بدنه سد تعبیه می گردد که ممکن است به صورت دیافراگم مرکزی یا در دامنه بالا دست به صورت یک دیافراگم مایل باشد
- جنس این پرده نفوذ ناپذیر را می توان از خاک رس ، سیمان ، چوب و غیره انتخاب نمود . دیافراگم مایل به نام پوشش مخفی نیز نامیده می شود . پرده های آب بند اعم از این که در قسمتهای مرکزی یا کناری قرار گیرند باید تا بالاترین نقطه سد ادامه یابند
- در صورتی که شالوده زیرین نفوذ پذیر بوده و کم عمق باشد ترجیحاً باید ادامه پرده آب بند تا انتهای بخش نفوذ پذیر شالوده برسد

# نوع دیافراگمی سدهای خاکی




*Waterfall Dam, Hong Kong.*

الف ـ دیافراگم محوری قائم



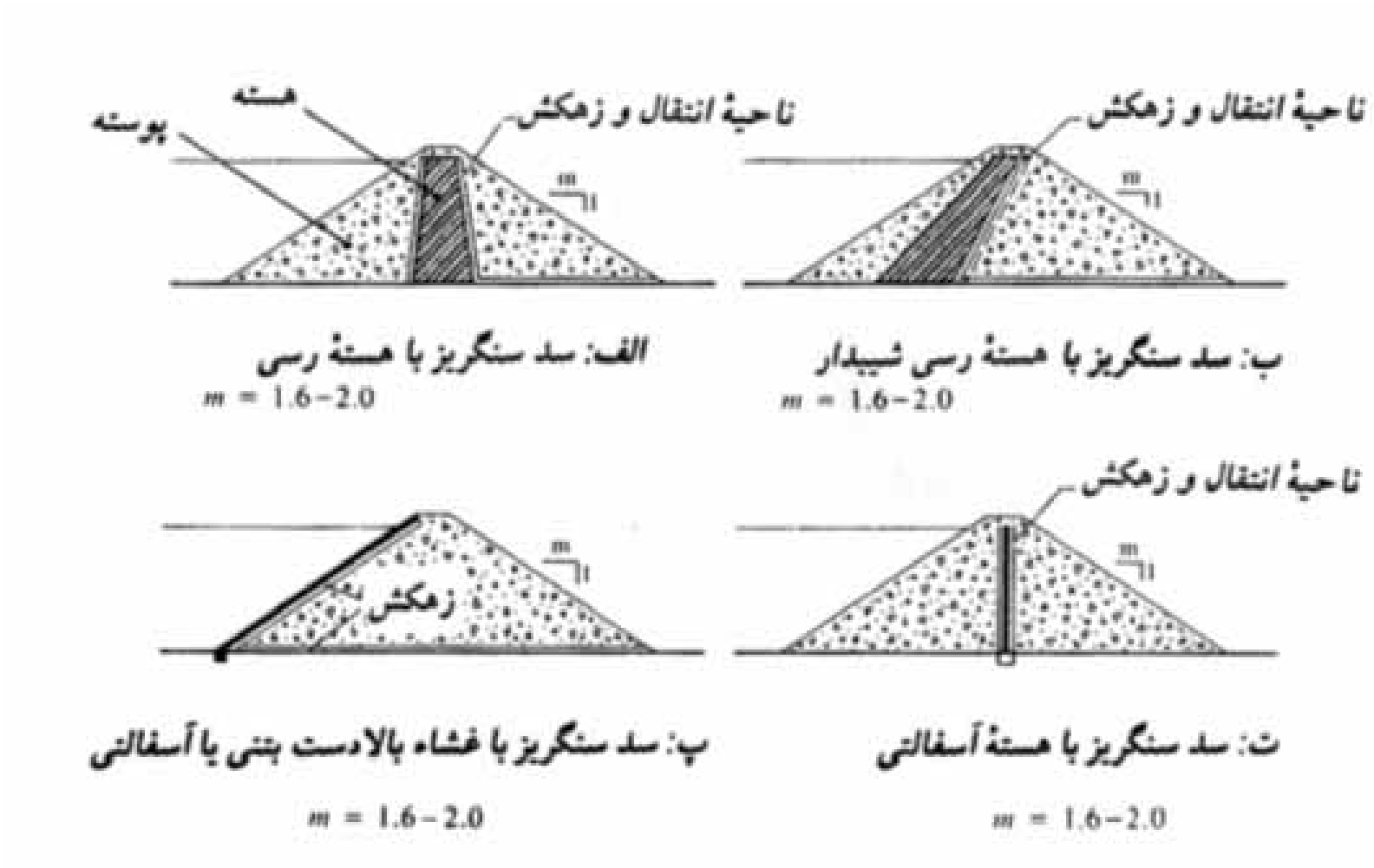

Nekhranitse Dam (Czechoslovakia)

ب ـ پوشش مخفی در بالادست سد

# نوع دیافراگمی سدهای خاکی

- دیافراگم داخلی که از مواد صلب مانند بتن ساخته شوند ممکن است به علت نشست سد در بعضی از نقاط شکسته شوند ، از این رو ترجیح داده می شود که مغزه دیافراگمی در وسط سد از خاک رس ساخته شود که عرض این مغزه خاکی در قاعده سد باید از ۰/۳ تا ۰/۵ برابر ارتفاع سد باشد
- قرار دادن مغزه دیافراگمی در وسط سد از سهولت ساخت برخوردار است در حالی که دیافراگم مایل نسبت به دیافراگم محوری تا حدی پایداری بیشتری را در برابر زلزله تأمین می کند
- چنانچه جدار دیافراگمی تمامی ارتفاع از تاج سد تا انتهای شالوده نفوذ پذیر را نپوشاند آنرا دیافراگم ناقص نامند . ممکن است بخشهای عمیق شالوده را در زیر دیافراگم ناقص به وسیله تزریق یا پرده سپرهای فلزی و غیره آب بندی نمود

# مقاطع تیپ سدهای سنگریزه ای




الف: سد سنگریز با هستهٔ رسی
$m = 1.6-2.0$

ب: سد سنگریز با هستهٔ رسی شیبدار
$m = 1.6-2.0$

پ: سد سنگریز با غشاء بالادست بتنی یا آسفالتی
$m = 1.6-2.0$

ت: سد سنگریز با هستهٔ آسفالتی
$m = 1.6-2.0$

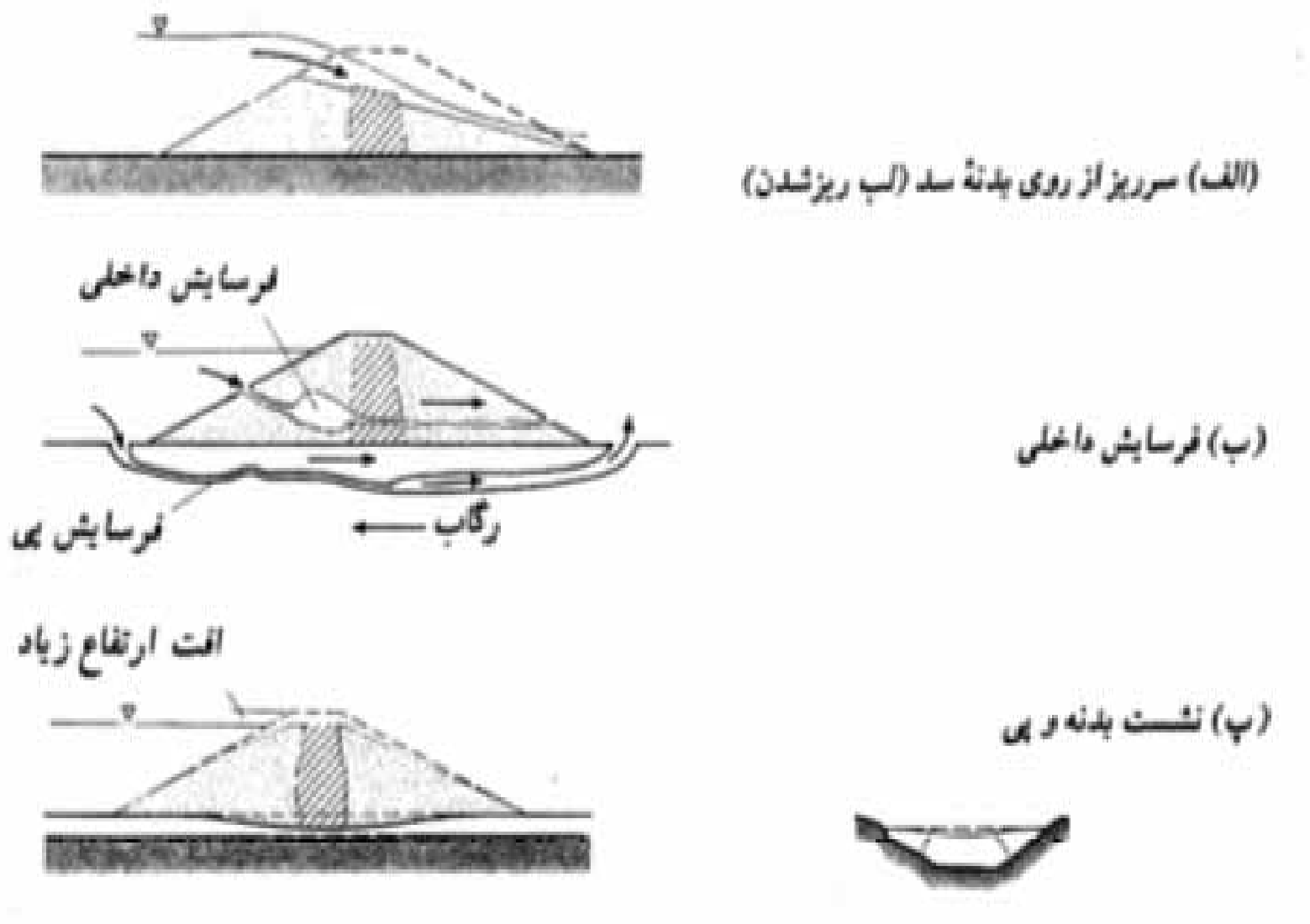
# کنترل تراوش

- **۱ ـ ایجاد دیواره جدا کننده یا نفوذ ناپذیر**
- ـ توسط ایجاد پرده تزریق
- ـ توسط حفر ترانشه در زیر هسته مرکزی و پرکردن آن از مواد و مصالح نفوذ ناپذیر
- ـ استفاده از گل حفاری در ایجاد دیواره جدا کننده ( کانالی حفر می گردد و دیواره آن توسط گل حفاری نفوذ ناپذیر می گردد )
- ـ ایجاد دیوار جدا کننده بتنی به منظور جلوگیری از تراوش آب

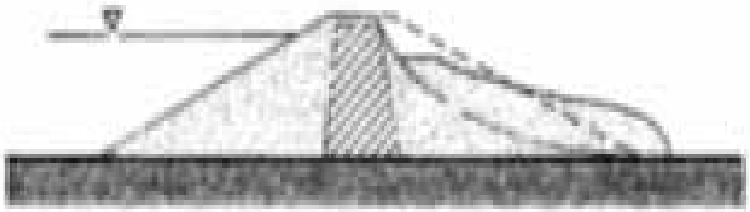
# کنترل تراوش

- **۲ ـ ایجاد زهکش ها :** در بدنه و گاهی اوقات در پی سد ایجاد زهکش می تواند مسئله تراوش را کنترل نماید
- **۳ ـ ایجاد فیلترها :** که در ارتباط با زهکش ها کار می کنند و نقش جلوگیری از آب بردگی دانه های ریز خاک خصوص در هسته مرکزی را ایفا می کنند
- **۴ ـ هسته مرکزی :** جزء اصلی بدنه سد خاکی را تشکیل می دهد و نقش آن ایجاد غیر قابل نفوذترین قسمت سد می باشد تا نقش اصلی جلوگیری از عبور آب را بعهده داشته باشد
- **۵ ـ چاههای زهکش :**اگر تراوش از طریق پی سد کاملاً کنترل نشود می توان با حفر تعدادی چاه در پائین دست به کنترل نسبی آن اقدام نمود و فشارهای حفره ای و تراوش را در پی سد کنترل نمود
- **۶ ـ ایجاد پوشش غیر قابل نفوذ در بالا دست :**از این پوشش به همراه چاههای زهکشی ذکر شده در فوق استفاده می شود

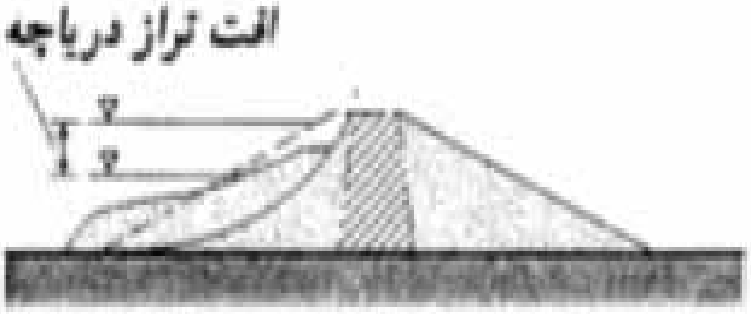
# اشکال مختلف خرابی در یک سد خاکریزه ای



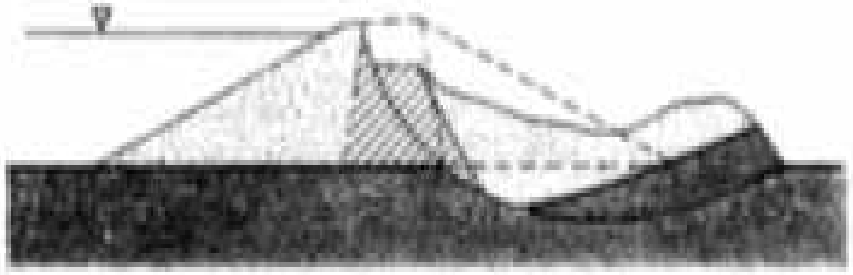
# اشکال مختلف خرابی در یک سد خاکریزه ای



(ث) لغزش شیب پایین دست




(ث) لغزش شیب بالادست



(ج) لغزش عمیق شیب پایین دست

# مکانیسم های خرابی سدهای خاکریزه ای و روشهای جلوگیری از آنها

| خرابی | مشخصه | علت | راه علاج |
|---|---|---|---|
| *خارجی* | | | |
| لبریز شدن | جریان از روی سد و فرسایش آن | سرریز و یا ارتفاع آزاد ناکافی نشست بدنه و یا پی | افزایش ارتفاع آزاد و یا ظرفیت سرریز ، جبران نشست و یا اضافه کردن ارتفاع |
| فرسایش موج | خسارت به شیب بالادست | غشاء محافظ صدمه می بیند | نگهداری و طراحی صحیح |
| فرسایش پنجه | جریان سیل باعث خسارت به پنجه می شود | مسیر کانال تخلیه سرریز بد انتخاب شده | دقت در طرح هیدرولیکی صحیح و دیوار محافظ |
| چسبناک شدن | فرسایش شیب پائین دست به علت بارندگی | زهکشی سطحی ناقص | چمن کاری شیب و یا زهکشی درست آن |

# مکانیسم های خرابی سدهای خاکریزه ای و روشهای جلوگیری از آنها

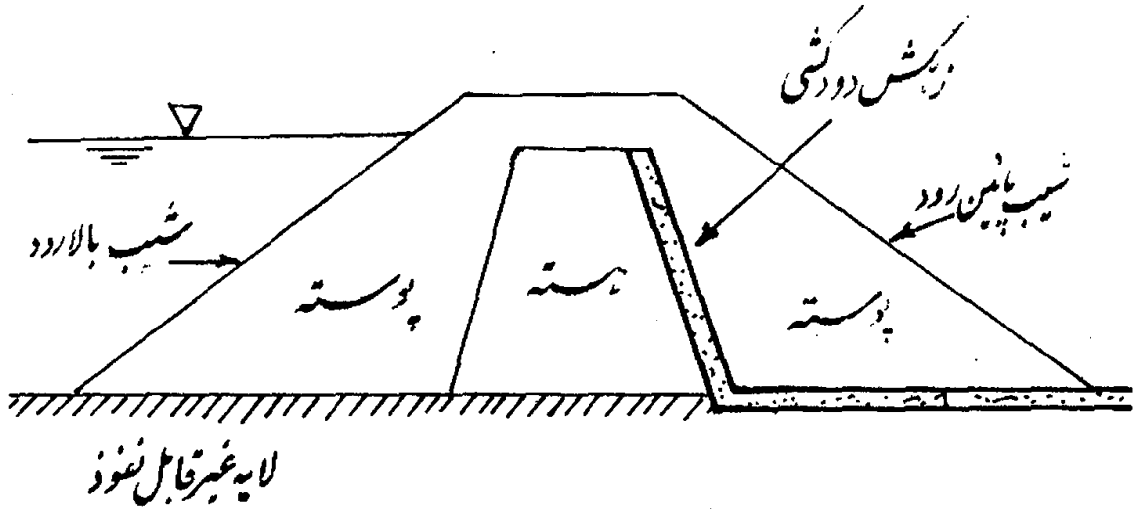
| خرابی | مشخصه | علت | راه علاج |
|---|---|---|---|
| ***نشت داخلی*** | | | |
| اتلاف آب | افزایش نشت | پی نفوذ پذیر آب بند ناقص ترک داخلی | پردهٔ اب بند و یا تزریق هسته دقت در طرح و تزریق |
| فرسایش نشت | نشت کدر | ترک داخلی نشت از اطراف تونل تخلیه | زهکشی داخلی ، فیلترها و ناحیه بندی صحیح خاکریز استفاده از حلقه های آب بند |
| ***ناپایداری*** | | | |
| لغزش پی | | پی ضعیف و فشار حفره ای بالا | تحکیم و زهکشی پی و اصلاح آن |
| شیب بالادست | تغییر شکل هندسهٔ بدنه سد | فشار حفره ای زیاد ، شیب تند و افت سریع آب دریاچه | زهکشی ، شیب تخت و احداث برم |
| لغزش جریان | مکانیسم جریان سریع | حرکت یا شک سریع ـ خاکهای لای حداکثر ریسک را دارا هستند | تراکم کافی و یا اضافه کردن برم پنجه |

# مکانیسم های خرابی سدهای خاکریزه ای و روشهای جلوگیری از آنها

| خرابی | مشخصه | علت | راه علاج |
|---|---|---|---|
| *تغییر شکل* | | | |
| نشست | کم شدن ارتفاع آزاد | تغییر شکل بعلت تحکیم بدنه یا پی و یا بعلت فرسایش داخلی | افزایش ارتفاع آزاد ، فیلتر محافظ و طرح خوب جزئیات داخلی |
| داخلی | تغییر شکل هندسه خارجی و ترک داخلی | تغییر شکل نسبی نواحی و مصالح | طرح خوب جزئیات داخلی با نواحی انتقال عریض |

# زهکش دودکشی

- این زهکش تشکیل شده از یک فیلتر که دانه بندی آن باید به ترتیبی طراحی گردد که بتواند مانع عبور ذرات خاک از هسته گشته و از به اشباع در آمدن قسمتی از سد که در سمت پائین رود قرار دارد نیز جلوگیری کند




شکل ـ سدخاکی با هسته و زهکش دودکشی

# زهکشی در بدنه سد

- زهکشی در بدنه سد به منظور جمع آوری و هدایت زه عبور کرده در بدنه و یا از پی می باشد و هدف آن این است که دامنه پایین دست حتی الامکان خشک نگاه داشته شود و نیز از ایجاد هرگونه اضافه فشار آب حفره ای در مناطق مختلف سد جلوگیری گردد .
- از آنجا که زهکشهای دارای نفوذ پذیری زیاد ( واز قطعات درشت دانه )می باشند، لازم است ارتباط آنها با بدنه و ( بخصوص با مغزه سد ) به صورت تدریجی باشد یعنی الزاماً منطقه ای به نام فیلتر بین زهکش و خاک بدنه تعبیه گردد . این فیلتر ممکن است از یک لایه و یا چند لایه تشکیل شده باشد که هر لایه ای برای لایه زیرین نقش فیلتر را دارد

# زهکش لایه ای افقی

- این نوع زهکش که در دامنه پائین دست و در قاعده سد قرار می گیرد ، تمامی زه درون بدنه و قسمت عمده زه پی را به طرف بیرون سد هدایت میکند
- این نوع زهکشها ، همانگونه که قبلاً اشاره شد بوسیله یک یا چند طبقه فیلتر به خاک بدنه سد متصل می گردند
- ممکن است یک پنجه سنگی و یا یک لایه زهکشی در پنجه سد ، سیستم زهکشی افقی را تکمیل کند
- نقش دیگری که زهکش افقی ممکن است داشته باشد در شرایطی است که پی تحکیم پذیر و نفوذ پذیر باشد ، در این صورت وجود لایه ای از زهکش افقی می تواند تحکیم لایه زیرین را ( در اثر وجود بار سد ) تسهیل و تسریع کند
- طول و ضخامت زهکش باید بر اساس میزان محتمل زه و شرایط دیگر تعیین گردد
- عموماً می توان حداکثر طول زهکش افقی را با اطمینان کامل سه برابر ارتفاع سد در نظر گرفت

# زهکش مایل

- قرار دادن زهکش مایل در نیمه پائین دست سد با شیبهای مختلف در سدهای همگن نیز کاملاً معمولی است ابتدای این نوع زهکش تقریباً به محور سد یعنی تا زیر تاج آن می رسد و انتهای آن به زهکش افقی متصل می گردد
- وجود این نوع زهکش که عمدتاً هدایت زه به زهکش افقی است ، در مناطق زلزله خیز به پایداری سد نیز کمک می کند ، زیرا در صورت بروز شکستگی ها در بخش غیر اصطکاکی بدنه از گسترش آنها و ایجاد جریانهای قوی آب جلوگیری می کند
- در مناطق زلزله خیز قرار دادن لایه های فیلتر در دامنه بالادست به منظور التیام شکستگیهای احتمالی نیز در جهت اطمینان است ، که در این مورد رعایت معیار دانه بندی فیلتر ممکن است با همان دقتی که برای زهکش پائین دست منظور می شود ضروری نباشد
- ممکن است زهکش مایل را به طور قائم ایجاد نمود که در اینصورت محل آنرا می توان در محور سد یا بالادست و پائین دست انتخاب کرده و حتی زهکش مایل را نیز می توان در بدنه بالادست قرار داد . محل قرار دادن زهکش و نوع آن بستگی به مسائل اقتصادی و شرایط دیگر دارد .
- چنانچه حجم زهکش میانی سد نسبت به حجم کل بدنه مقدار قابل توجهی باشد، باید آنرا مغزه زهکشی نامید . این مورد نیز در سد سازی تجربه شده است و بعنوان نمونه میتوان از سد Vrtac در یوگسلاوی یاد نمود که به ارتفاع ۱۸ متر دارای یک مغزه زهکشی به ارتفاع ۱۲ متر وعرض قاعده ۱۸ متر می باشد

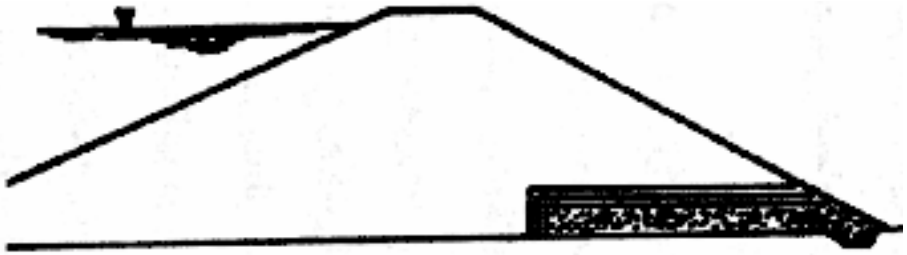
# پنجه سنگی

- پنجه سنگی سیستمی است که از سنگهایی با قطعات درشت تشکیل می شود و می تواند بدون وجود زهکش افقی و یا توأم با زهکش افقی مورد استفاده باشد
- اندازه قطعات سنگهای تشکیل دهنده پنجه سنگی حدود ۱۵ تا ۲۰ سانتیمتر معمول است . پنجه سنگی نیز باید با لایه های فیلتر به بدنه شالوده اتصال بیابد . بعنوان نمونه دانه بندی لایه های فیلتر یک پنجه سنگی را می توان به شرح زیر انتخاب نمود :
- یک لایه ۳۰ سانتیمتری از ماسه ریز ( ۱۵٪ آن برابر ۰/۰۹ میلی متر )
- یک لایه ۴۵ سانتیمتری از ماسه دشت ( ۱۵٪ آن برابر ۰/۸۱ میلی متر )
- یک لایه ۶۰ سانتیمتری از شن ( ۱۵٪ آن برابر ۷/۳ میلی متر )
- ارتفاع حداقل پنجه سنگی باید چنان باشد که خط زه با اطمینان کامل از دامنه پائین دست دور نگه داشته شود و اگر در سطح پائین دست آب جمع می شود این آب نیز موجب کم شدن راندمان پنجه سنگی نگردد . ارتفاع پنجه سنگی را می توان  تاارتفاع سد در نظر گرفت .
- خط الرأس پنجه سنگی باید به قدر کافی بالاتر از سطح آب جمع شده در پائین دست باشد تا از هر گونه اثرات موج روی جبهه پایین دست جلوگیری نماید . در بعضی موارد اقتصادی نیست که سطح پنجه سنگی را برای این هدف بالاتر قرار دهند و در چنین مواردی سنگ چینی را تا یک ارتفاع حداقل قائم یعنی تا ۱/۵ متری بالای سطح آب جمع شده در پایین دست ادامه می دهند .
- جبهه ورودی آب در پنجه سنگی با شیب یک به یک و جبهه خروجی آن ادامه شیب پائین دست ساخته می شود .

# انواع اصلی زهکشی بدنه در سدهای خاکی



ب ـ زهکش مایل وافقی



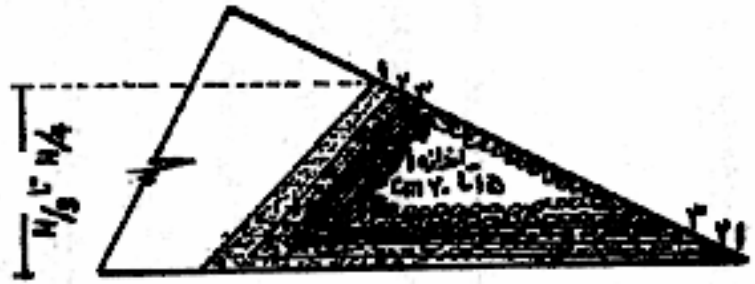
الف ـ زهکش لایه‌ای افقی

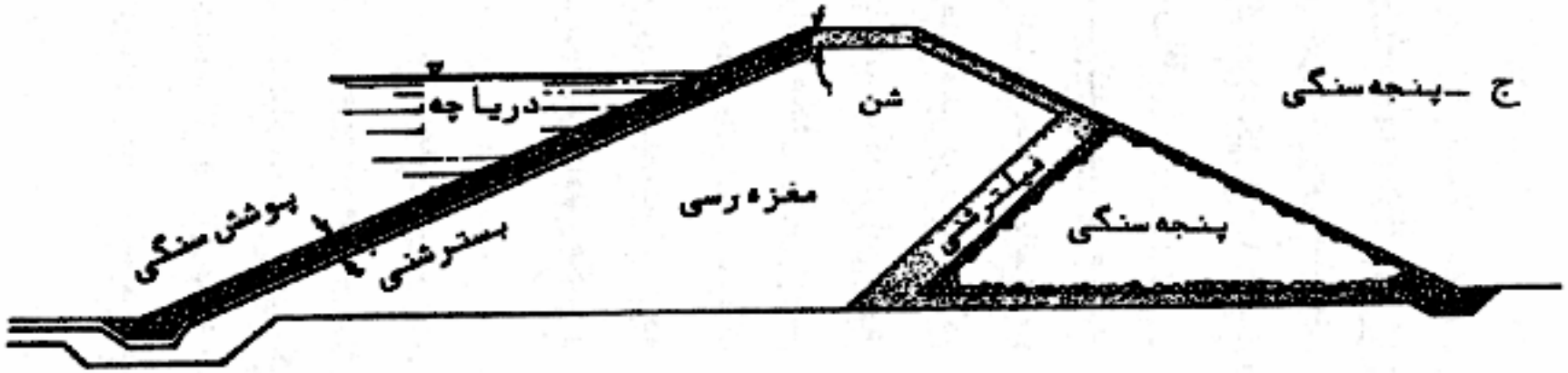
۱ - لایه های فیلتر ، ماسه متوسط تا درشت به ضخامت ۰/۳ متر در لایه مایل

۲ - ماسه درشت‌تاشن(D=۵-۱۲mm)به ضخامت ۰/۲۵تا۰/۲۵ متردرلایه مایل

۳ - سنگ خرد شده (D=۲۵-۷۵mm) به ضخامت ۰/۲۵ تا ۰/۶ متر در لایه مایل

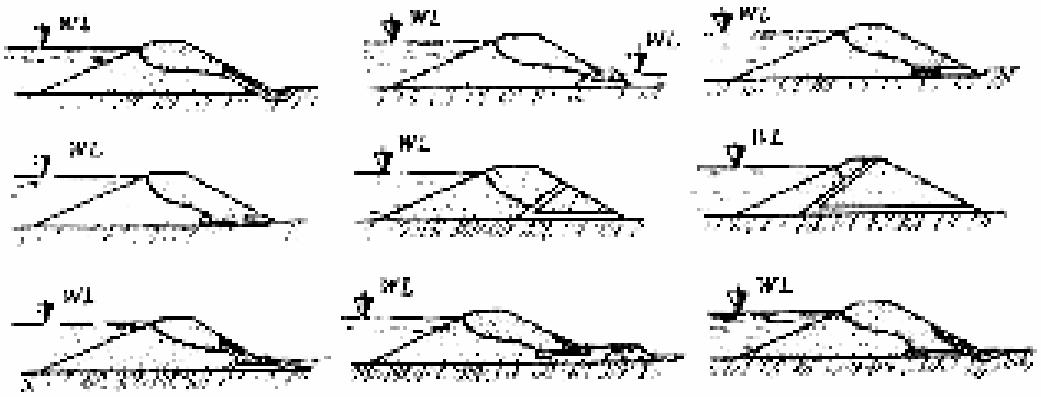
۱و۲و۳ ضخامت هر لایه افقی ۰/۱۵ متر



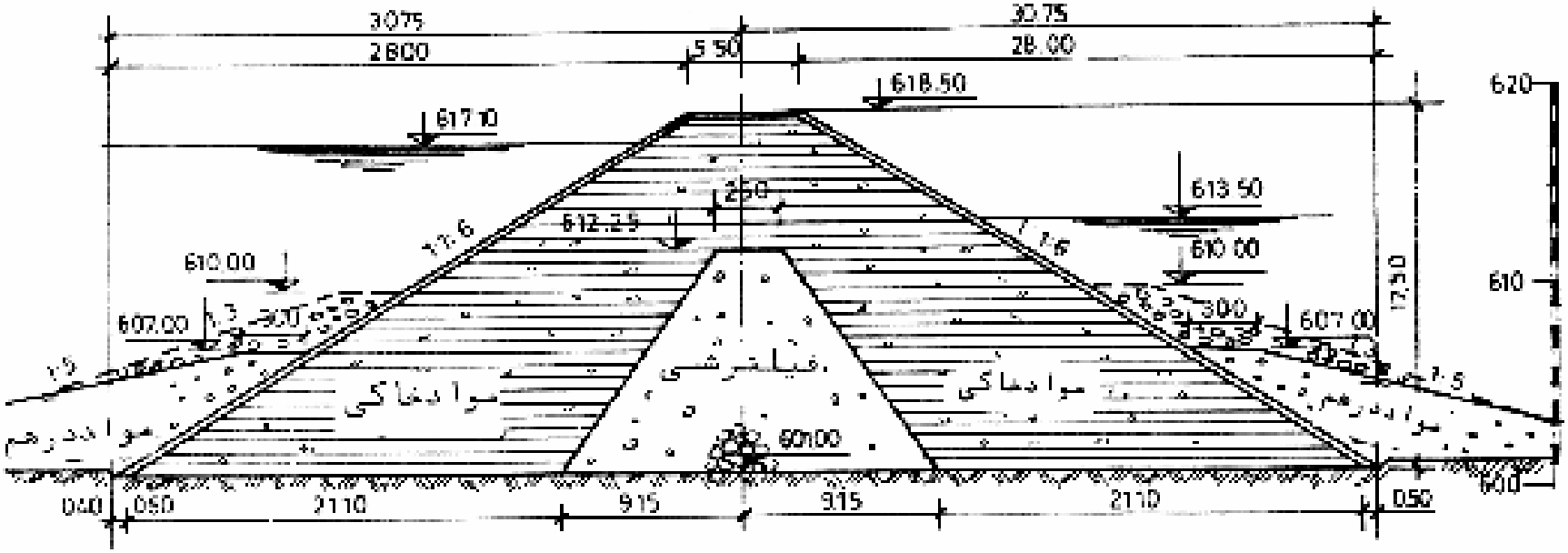




ج ـ پنجه سنگی

# مغزه زهکشی وشکل ساده انواع زهکشها



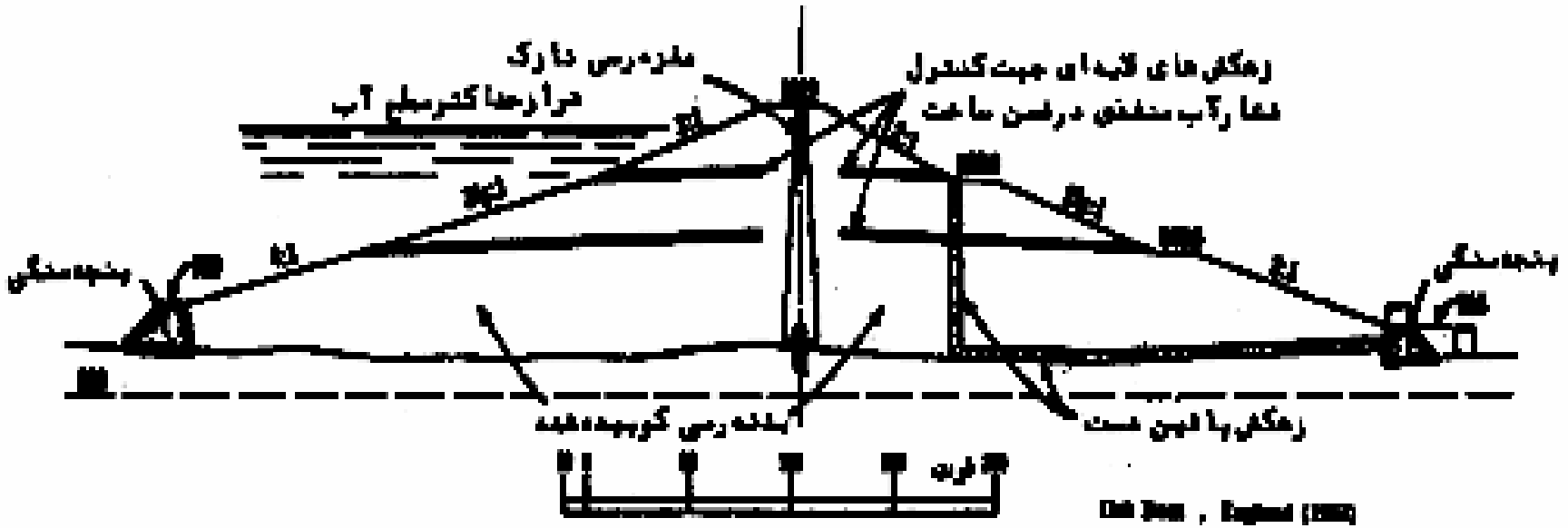
الف- انواع زهکش ها در دامنه پائین دست

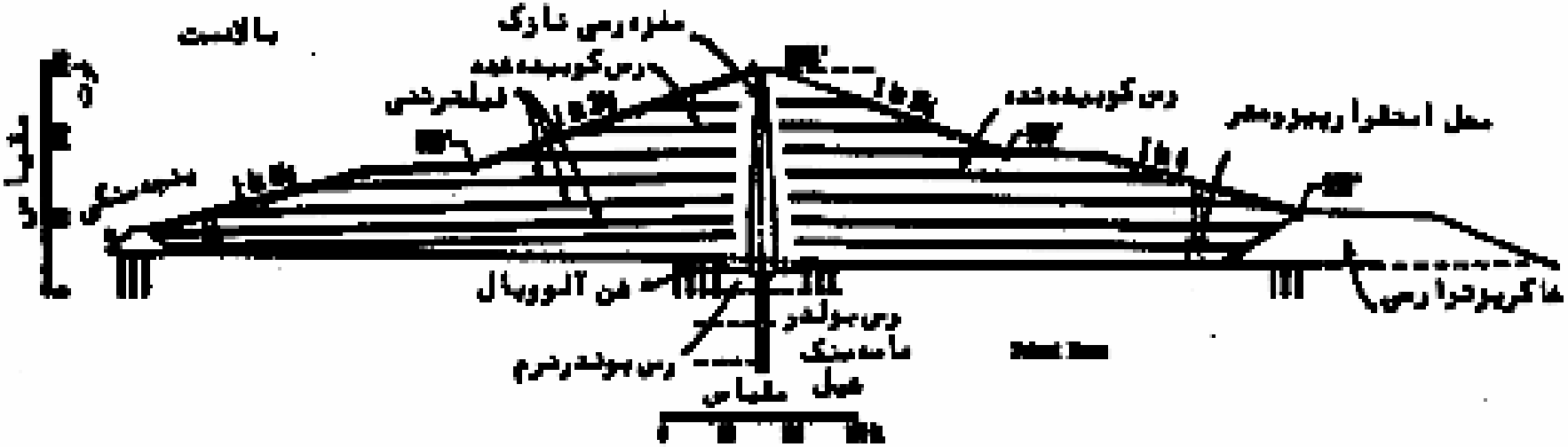



Vrtac diam.

ب- مغزه زهکشی

# دو نمونه از زهکشهای لایه ای در بدنه سد

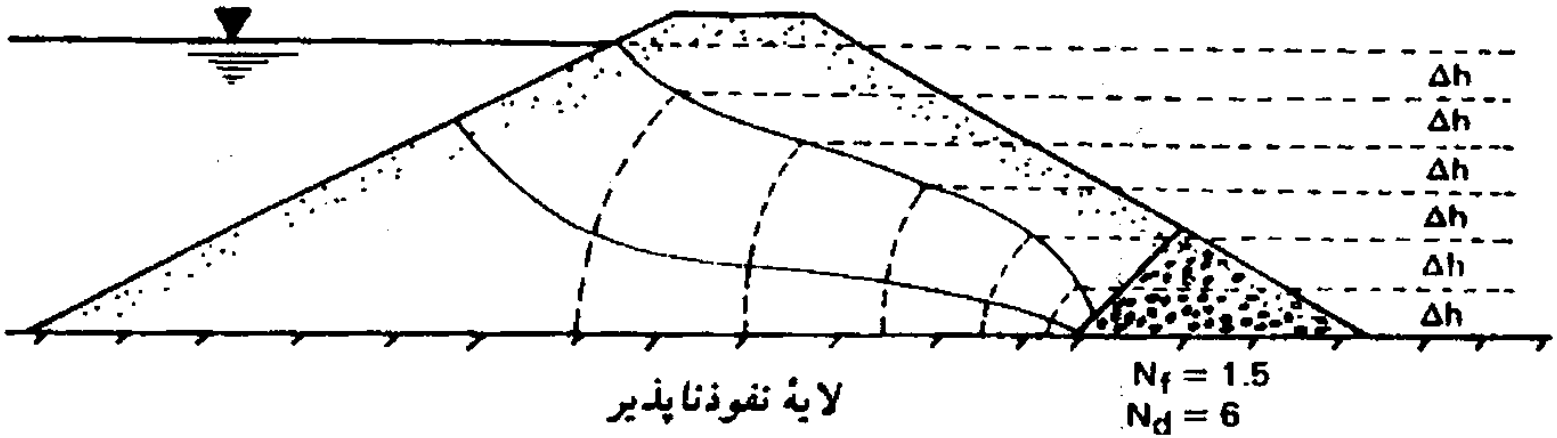


# شرایط صافی های و طراحی فیلتر

- وقتی که جریان نشت آب از یک خاک با دانه های نسبتاً ریز به مصالح درشت دانه تر وارد می شود ، این خطر وجود دارد که ذرات ریز خاک به داخل مصالح درشت دانه تر شسته شوند
- اگر این کار دریک مدت زمان طولانی انجام بگیرد ، ذرات ریز ممکن است تمام فضای بین مصالح درشت دانه را پر کرده و آن را مسدود نمایند
- برای رفع چنین مشکلی بین دو لایه ریز و درشت ، از یک لایۀ فیلتر ( یا فیلتر محافظتی ) استفاده می شود

## بعنوان مثال مقطع سد خاکی شکل زیر را در نظر بگیرید :




**شبکهٔ جریان برای مقطع یک سد خاکی با فیلتر سنگی پایین‌دست**

اگر در پنجه سد ، بین خاک بدنه اصلی سد و سنگریزه های زهکش ، لایه فیلتر منظور نگردد ، ذرات ریز قسمت اصلی به سمت سنگریزه ها شسته شده و آن را مسدود می نمایند و در نتیجه سیستم زهکش سد از کار می افتد یا آنکه به تدریج مصالح سازنده بدنه به بیرون شسته شده و حفره اولیهٔ ایجاد خرابی تشکیل می گردد

**برای انتخاب صحیح مصالح فیلتر باید دو معیار زیر بر آورده شود :**

- ۱ – اندازه حفرات مصالح فیلتر باید به قدر کافی ریز باشد تا از شسته شدن خاک مورد محافظت به داخل آن جلوگیری شود

- ۲ ـ مصالح فیلتر باید دارای نفوذ پذیری بالا باشند تا از بوجود آمدن نیروهای نشت زیاد و فشار هیدرواستاتیک درمصالح فیلتر جلوگیری شود

بر پایه تحقیقات تجربی ، برترام در ۱۹۴۰ معیارهای زیر را برای بر آورده کردن دو شرط فوق پیشنهاد نمود:

- ( رابطه ۱ ) برای اقناع شرط ( ۱ ) 5 تا $\frac{(D_{15})_F}{(D_{85})_S} \geq 4$
- ( رابطه ۲ ) برای اقناع شرط ( ۲ ) 5 تا $\frac{(D_{15})_F}{(D_{15})_S} \leq 4$
- که در آن :

- $D_{15(F)}=$ قطری که ۱۵ درصد وزنی مصالح فیلتر ریزتر از آن است
- $D_{15(S)}=$ قطری که ۱۵ درصد وزنی خاک مورد محافظت ریزتر از آن است
- $D_{85(S)}=$ قطری که ۸۵ درصد وزنی خاک مورد محافظت ریزتر از آن است

# معیارهایی دیگر برای طراحی فیلتر

- ۱ ـ برای اجتناب از فرسایش ذرات خاک مورد محافظت به داخل فیلتر:

$$\frac{D_{15(F)}}{D_{15(S)}} \langle 20 \qquad \frac{D_{50(F)}}{D_{50(S)}} \langle 25 \qquad \frac{D_{15\ (F)}}{D_{85\ (S)}} \langle 5$$

اگر ضریب یکنواختی ( $\frac{D_{15(F)}}{D_{85(S)}}$ ) خاک مورد محافظت کمتر از ۱/۵ باشد نسبت $\frac{D_{15(F)}}{D_{85(S)}}$ میتواند تا ۶ افزایش یابد و اگر $C_u$ خاک مورد محافظت بزرگتر از ۴ باشد ، نسبت $\frac{D_{15(F)}}{D_{85(S)}}$ می تواند تا ۴۰ افزایش یابد

# معیارهایی دیگر برای طراحی فیلتر

- ۲ ـ برای جلوگیری از تولید نیروهای نشت بزرگ در فیلتر باید داشته باشیم :

$$\frac{D_{15(F)}}{D_{15(S)}} \rangle\ 4$$

- ۳ ـ مصالح فیلتر نباید دانه هایی با قطر بزرگتر از ۷۶ میلی متر داشته باشند ( این دستورالعمل به منظور جلوگیری از جدا شدگی دانه ها در فیلتر می باشد . )
- ۴ ـ به منظور جلوگیری از فرسایش داخلی ذرات ریز فیلتر و تأمین نفوذپذیری کافی ، نباید میزان ریز دانه های ریزتر از الک نمره ۲۰۰ در فیلتر بزرگتر از ۵ در صد باشد

# معیارهایی دیگر برای طراحی فیلتر

- ۵ ـ وقتی که به منظور جمع آوری آبهای زهکشی از لوله های سوراخ دار استفاده می شود ، باید در اطراف لوله ها لایهٔ فیلتر قرار داد تا از فرسایش ذرات ریز خاک به داخل لوله ها جلوگیری شود .
- همچنین برای جلوگیری از حرکت مصالح فیلتر به داخل لوله ها ، شرایط اضافی زیر باید بر آورده شود :

$$1.2 \text{ تا } 1.0 \rangle \frac{D_{85(F)}}{\text{قطرسوراخ}} \qquad 1.4 \text{ تا } 1.2 \rangle \frac{D_{85(F)}}{\text{عرض. شکاف}}$$

تانیکا چالام ، و ساکتیوادویل ، برپایه جمع بندی و تحلیل گزارشهای مربوط به فیلترها،روابط زیر را برای طراحی فیلتر محافظ خاکهای دانه ای پیشنهاد نمودند:

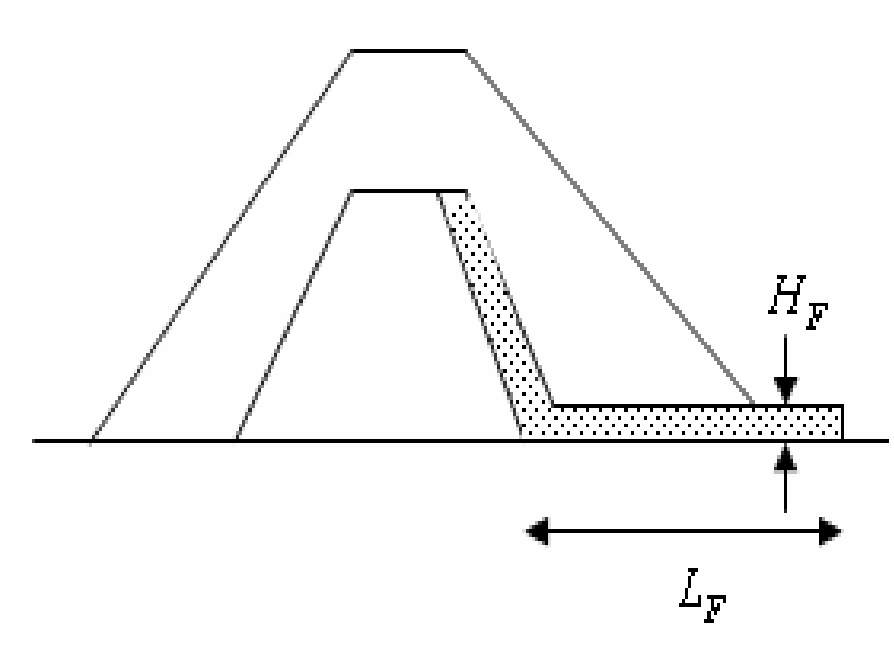
$$\frac{D_{60\,(S)}}{D_{10\,(S)}} = 0.4\,\frac{D_{10\,(F)}}{D_{10\,(S)}} - 2.0$$

$$\frac{D_{60\,(F)}}{D_{10\,(F)}} = 0.941\,\frac{D_{10\,(F)}}{D_{10\,(S)}} - 5.65$$

- $D_{60S}$ = قطری ازدانه هاکه ۶۰ درصدوزنی ذرات خاک از آن ریزترند
- $D_{10S}$ = قطری ازدانه ها که ۱۰ درصدوزنی ذرات خاک از آن ریزترند
- $D_{60F}$ = قطری از دانه ها که ۶۰ درصدوزنی مصالح فیلتر از آن ریزترند
- $D_{10F}$ = قطری ازدانه هاکه ۱۰ درصدوزنی مصالح فیلتر از آن ریزترند

# تعیین ضخامت زهکش

$$q = k_F .i.A = K_F \frac{H_F}{L_F} A$$




در عرض واحد خاکریز: $A = H_F \times 1$

$$q = K_F \frac{{H_F}^2}{L_F}$$

$$H_F = \sqrt{\frac{qL_F}{K_F}}$$

## جدول اندازه قطعه سنگها و ضخامت لایه سنگچین

| ضخامت لایه (cm) | حداکثر اندازه وزن قطعات kg f ) | اندازه قطعه سنگ متوسط D50 ( cm) | حداکثر ارتفاع موج ( m) |
|---|---|---|---|
| ۳۱ | ۴۵/۳۵ | ۲۰ | ۰-۰/۳۱ |
| ۳۸ | ۹۰/۷ | ۲۵ | ۰/۳۱-۰/۶۱ |
| ۴۶ | ۲۲۶/۷۵ | ۳۱ | ۰/۶۱-۱/۲۲ |
| ۶۱ | ۶۸۰/۲۵ | ۳۸ | ۱/۲۲-۱/۸۳ |
| ۷۶ | ۱۱۳۳/۷۵ | ۴۶ | ۱/۸۳-۲/۴۴ |
| ۹۱ | ۱۸۱۴ | ۶۱ | ۲/۴۴-۳/۰۵ |

رابطه هایی برای تعیین اندازه و وزن قطعه سنگهای مورد نیاز در سنگچین پیشنهاد شده است . یکی از این رابطه ها ، رابطه زیر است :

$$W_{50} = \frac{\gamma_r H_D^N}{K_r (G_S - 1)^3 \cot \alpha}$$

در این رابطه ، $W_{50}$ وزن قطعه سنگ متوسط ( یعنی قطعه سنگ به اندازه $D_{50}$ ) وزن واحد سنگ ، $H_D$ ارتفاع موج طرح ، N عدد توان است که از ۲ تا ۳ می تواند متغیر باشد؛ $K_r$ ضریب سنگ چینی است که عددی متغیر است ، $G_S$ وزن مخصوص قطعه سنگها ، و $\alpha$ زاویه شیب دامنه بالادست نسبت به افق است .

جدول زیر برای شرایط $G_S$=۲/۶ و $\gamma_r$ =۲/۶ tonf / $m^3$ و cot a= ۳ ، مقادیر وزن قطعه سنگهای با اندازه متوسط ($W_{50}$ ) را بر حسب کیلوگرم و تابعی از ارتفاع موج نشان می دهد .

- **جدول وزن قطعه سنگهای متوسط بر حسب کیلوگرم و تابعی از ارتفاع موجی**

| N | $K_{rr}$ | ارتفاع موج بر حسب متر | | |
|---|---|---|---|---|
| | | ۰,۶۱ | ۱,۲۲ | ۲,۴۴ |
| ۲ | ۱,۸۲ | ۹,۶ | ۵۲,۶ | ۲۱۴,۶ |
| ۲,۵ | ۳,۵ | ۱۰,۴ | ۵۵ | ۳۱۷,۵ |
| ۲,۶ | ۳,۲ | ۱۱,۸ | ۷۰ | ۴۲۶,۴ |
| ۲,۷ | ۳,۲ | ۱۲,۲ | ۸۰ | ۵۲۶,۲ |
| ۳ | ۵,۵ | ۱۴,۵ | ۹۶,۵ | ۵۶۹,۲ |

## ارتفاع آزاد (Free board )

ارتفاع آزاد اختلاف ارتفاع تراز حداقل تاج با تراز حداکثر دریاچه در هنگام سیلاب می باشد .

**عوامل موثر در انتخاب ارتفاع آزاد عبارتند از :**

۱ ـ تراز آب در بالای سرریز در زمان عبور دبی حداکثر خروجی

۲ ـ ارتفاع موج

۳ ـ نشست تابع زمان بدنهٔ سد و پی آن

۴ ـ شرایط پائین دست

ارتفاع موج نقش مهمی را در انتخاب ارتفاع آزاد بازی می کند . برای تعیین ارتفاع حداکثر موج در دریاچهٔ پشت سد معمولاً از روابط تجربی زیر استفاده می شود :

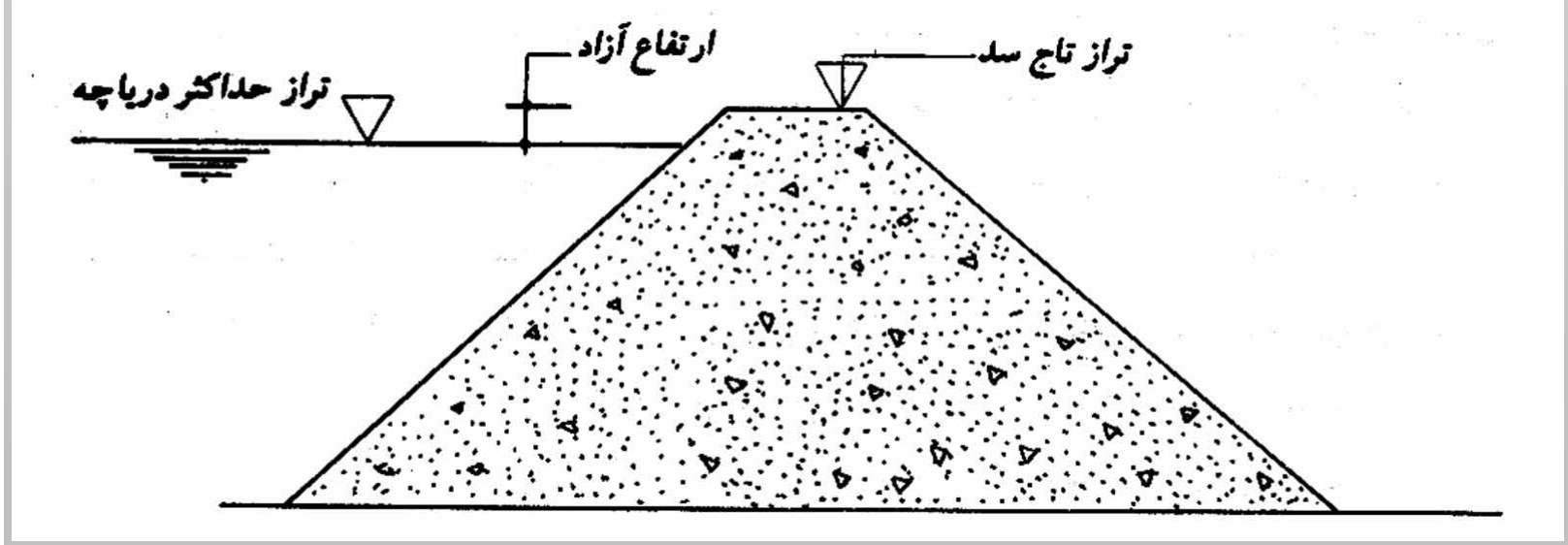
$$h_w = 0.032\sqrt{V.F} + 0.763 - 0.271F^{0.25} \qquad (F < 32km)$$

$$h_W = 0.032\sqrt{V.F} \qquad (F > 32km)$$

$h_w$ = ارتفاع موج بر حسب متر ($\frac{2}{3}$ آن در بالای تراز ایستابی و $\frac{1}{3}$ آن در زیر تراز ایستابی فرض می شود )

$V$ = سرعت باد بر حسب کیلومتر بر ساعت .

$F$ = دورخیز باد برحسب کیلومتر ( درصدی از ابعاد دریاچه درامتداد وزش باد منظور می شود)



برای تعیین ارتفاع آزاد باید به نشست تابع زمان بدنه و پی سد توجه خاص داشت . برای جبران این نشست ، تاج سدهای خاکی بصورت قوس محدب در راستای طول سد ( عرض دره ) ساخته می شود تا پس از وقوع تمام نشست ها ، سطح تاج بصورت افقی و در تراز مورد نظر قرار بگیرد .

در سدهایی که به عللی ارتفاع آزاد آنها در مقابل موجهای تولید شده کم است ، یک دیوار موج شکن در وجه بالا دست و به موازات تـــاج ســد احداث می گردد .

## محاسبه عرض تاج سد :

در عمل برای تعیین عرض تاج سد ( BC ) با توجه به ارتفاع کل آن از روابط زیر استفاده می شود :

سدهای کوتاه از ( ۵تا۱۰) متر $\begin{cases} BC = \frac{1}{5}H'' + 3 \\ BC = 1.11\sqrt{H''} + 3.0 \end{cases}$ یا

سدهای کوتاه تر از ۳۰ وبزرگتر از ۲۰ متر $\begin{cases} BC = 1.65\sqrt{H''} \\ BC = 0.55\sqrt{H''} + 0.2H'' \end{cases}$ یا

سدهای بزرگتر از ۳۰ متر $BC = 3.64\sqrt[3]{H'' - 1.83}$