

تغییر شکل پذیری و ایجاد ترک در سدهای خاکی

طی سال‌های متمادی طراحی سدهای خاکی عمدتاً بر مبنای کنترل نشت و حفظ پایداری آن در مقابل لغزش شیب‌ها صورت می‌گرفت. مع‌ذلک، در سال‌های اخیر، روشن شده است که تغییر شکل‌های ایجاد شده در داخل بدنه و پی سد اهمیت بسیار زیادی دارد و طراحی باید به گونه‌ای صورت گیرد که بدو از ایجاد ترک در سد جلوگیری و در صورت ایجاد کنترل شود.

ایجاد ترک در بسیاری از سدهای خاکی ممکن و قابل انتظار است، از این رو باید با تعبیه سیستم‌های فیلتر مناسب مخاطرات ناشی از آن را به حداقل رساند. معمولاً این سیستم فیلتر باید به گونه‌ای طراحی شود که از ایجاد و توسعه ترک در بدنه سد جلوگیری کند. فیلترهای بالا دست^۱ باید از مصالحی ساخته شوند که به سهولت شسته شده و در ترک‌های ایجاد شده در هسته سد نفوذ و موجب انسداد آنها شوند.

تغییر شکل‌های ایجاد شده در یک سد خاکی را می‌توان در سه گروه طبقه‌بندی کرد [۲ و ۷] :

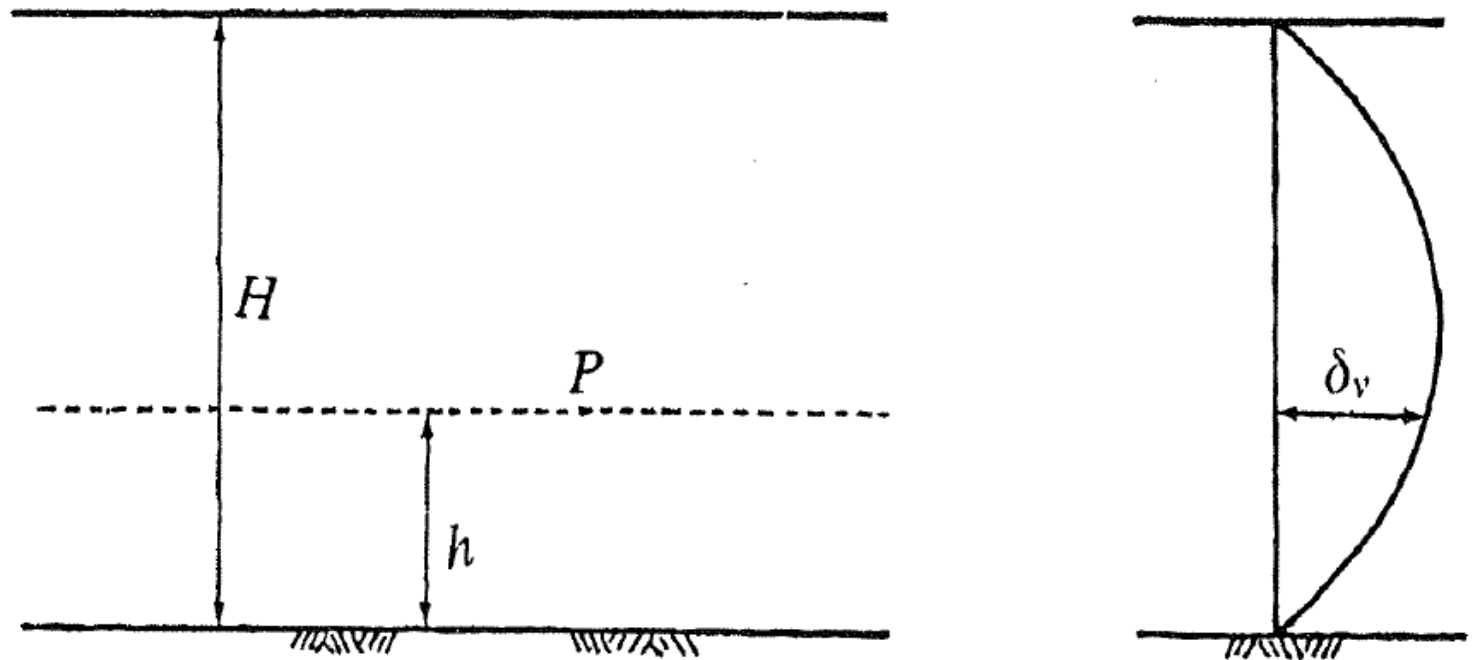
(۱) تغییر شکل‌های ایجاد شده طی زمان ساخت

(۲) تغییر شکل‌های ناشی از آبرگیری مخزن

(۳) تغییر شکل‌های بلندمدت ناشی از تحکیم و خزش^۲

۱۰-۲- تغییر شکل های مرحله ساخت

به هنگام ساخت بدنه یک سد خاکی یا سنگریز، وزن مصالح و افزایش تدریجی آن (با افزایش ارتفاع سد) موجب نشست بدنه می شود. در شکل ۱۰-۱ تغییر شکل قائم (نشست) یک لایه افقی در عمق h نشان داده شده است.



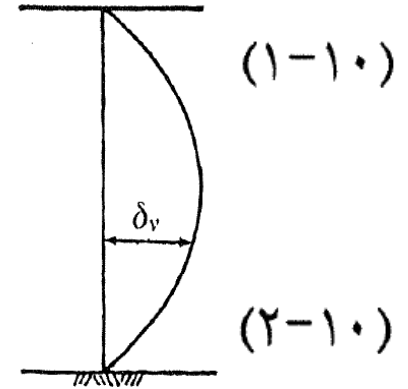
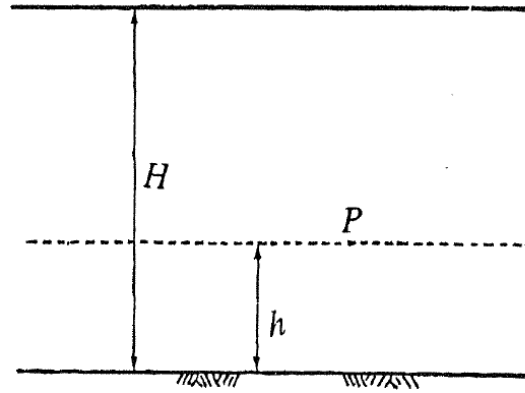
شکل ۱۰-۱- فرایند ایجاد تغییر شکل طی زمان ساخت

قسمت سمت راست شکل تغییر مقدار نشست ایجاد شده در مقطعی به ارتفاع H را نشان می‌دهد. در اینجا فرض بر این است که صفحه نشست سنج^۱ در نقطه P در ارتفاع h استقرار یافته است. در هر عمقی مانند h مقدار تغییر شکل قائم δ_v در نقطه‌ای مانند P و برای خاکریزی به ارتفاع H بنابر روابط زیر به دست می‌آید:

$$\varepsilon = m_v \cdot \Delta \sigma$$

$$= m_v \cdot \gamma (H - h)$$

$$\delta_v = m_v \cdot h \cdot (H - h) \cdot \gamma$$



$\delta_v =$ مقدار کل تغییر شکل قائم (نشست) در نقطه P که در این روابط:

$\varepsilon =$ تغییر شکل نسبی به ازای هر افزایش تنش به میزان $\Delta \sigma$

$\Delta \sigma =$ افزایش تنش قائم

$m_v =$ ضریب تغییر شکل پذیری مصالح^۲

$\gamma =$ وزن واحد حجم مصالح خاکریز

$H =$ کل ارتفاع سد

$h =$ ارتفاع نقطه مورد بررسی در بدنه سد نسبت به قاعده آن

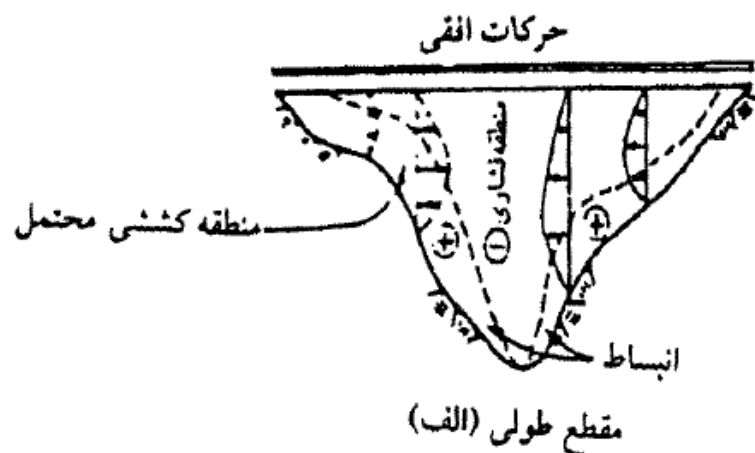
با توجه به معادله ۱۰-۲، مشاهده می شود که تغییرات δ_v نسبت به ارتفاع به صورت سهمی است. بدین معنی که نشست سنج نصب شده در نقطه P هنگامی حداکثر مقدار را نشان می دهد که P در وسط لایه قرار داشته باشد و چنانچه موقعیت P در سطح فوقانی یا تحتانی لایه باشد، مقدار تغییر شکل صفر خواهد بود. البته در این حالت فرض شده است که بدنه سد روی یک پی سنگی بسیار مقاوم و نشست ناپذیر استقرار یافته است. همچنین در شکل مذکور وقوع نشست آنی فرض شده است.

$$\varepsilon = m_v \cdot \Delta \sigma \quad (1-10)$$

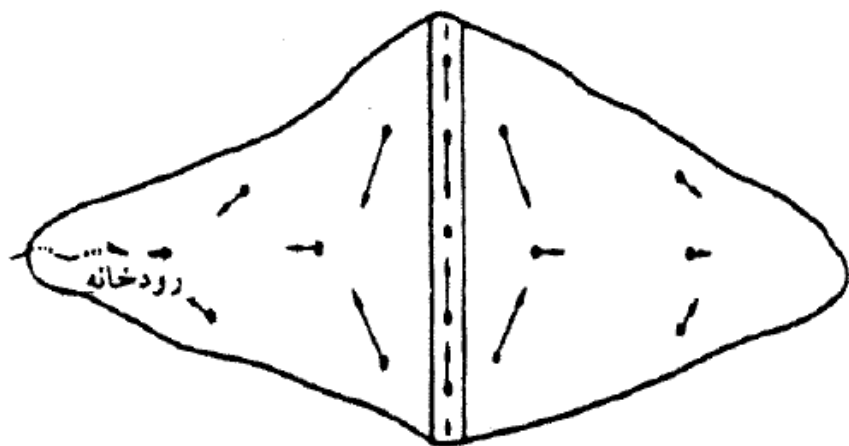
$$= m_v \cdot \gamma (H - h)$$

$$\delta_v = m_v \cdot h \cdot (H - h) \cdot \gamma \quad (2-10)$$

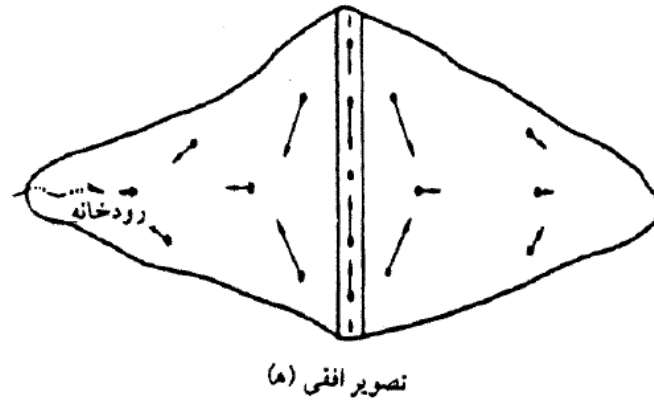
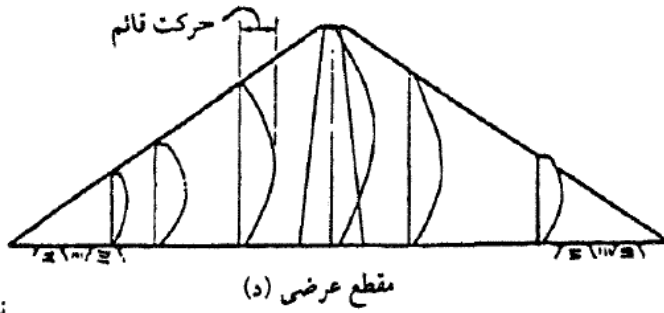
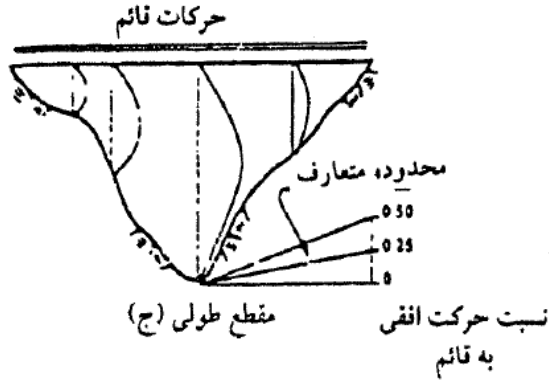
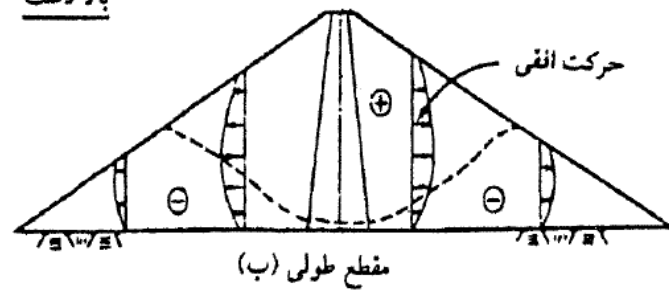
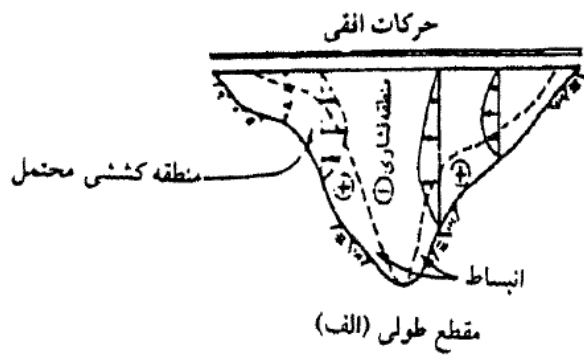
چنانچه سد خاکی در یک دره باریک با مقطع " V " شکل احداث شود، مقدار نشست در قسمت وسط (به دلیل عمق بیشتر مصالح نشست پذیر) بیشتر است و در جناحین مقادیر کمتری را خواهد داشت. این امر خود ممکن است به ایجاد ترک های کششی در حد فاصل دو محدوده منجر شود (شکل ۱۰-۲ الف). این نوع ترک کششی معمولاً به صورت عرضی و در جهت عمود بر محور سد رخ می دهد و ممکن است تمام بدنه سد را از بالادست تا پایین دست طی کند که در این صورت به علت ایجاد معبر مناسب برای نشت متمرکز آب ممکن است بسیار مخاطره انگیز باشد.



در شکل ۱۰-۲ تغییرات مقادیر حرکات افقی در مقاطع عرضی و طولی سد در قسمت‌های "الف و ب" و تغییرات حرکات قائم (نشست) در دو مقطع مذکور در قسمت‌های "ج" و "د" نشان داده شده و در قسمت "ه" جهت عمومی حرکات مصالح در بدنه سد در تصویر افقی مشخص گردیده است. همان‌طور که در شکل اخیر (قسمت "ه") مشاهده می‌شود، جهت عمومی حرکت مصالح در هر دو مقطع بالادست و پایین دست به سمت دور شدن از تاج و در روی تاج به سمت وسط آن است. به عبارت دیگر، حرکت مصالح در نیمرخ عرضی به سمت خارج (بالادست و پایین دست تاج) و در نیمرخ طولی به سمت داخل (خط القعر دره) است.



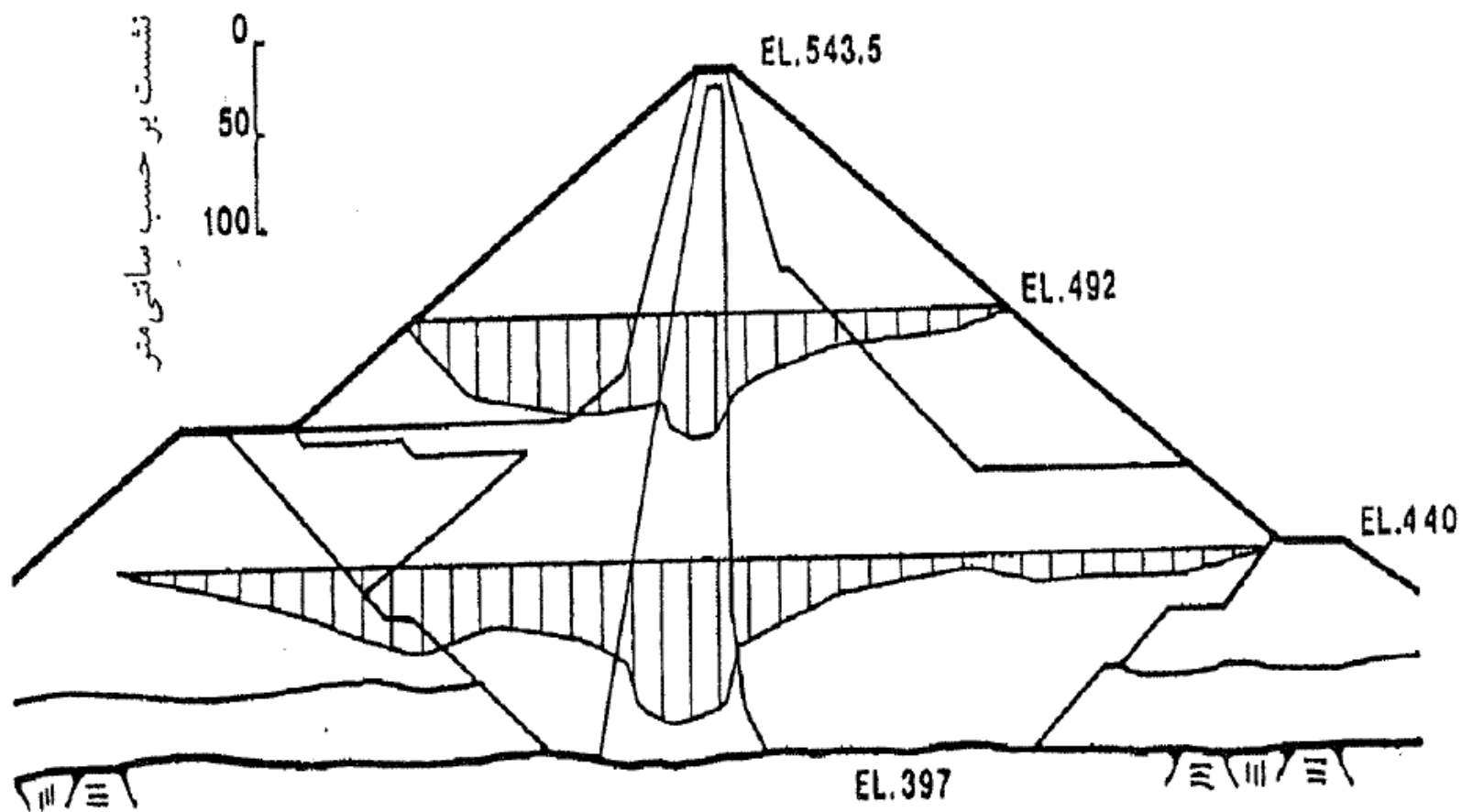
نصیر افقی (ه)



شکل ۱۰-۲- حرکات بدنه سد خاکی در حین ساخت

چنانچه بدنه سد از مناطق مختلف دارای مصالح متفاوت تشکیل شده باشد، عدم تطبیق در تغییر شکل پذیری این مصالح مختلف ممکن است منجر به ایجاد تغییر شکل های بسیار متفاوت بین مناطق مجاور گردد. برای مثال، در شکل ۱۰-۳ تغییر شکلهای قائم (نشست) ایجاد شده در قسمت های مختلف بدنه سد لا آنگوستورا^۱ در کشور مکزیک نشان داده شده است. این سد از نوع غیرهمگن با هسته مرکزی و پوسته های بالادست و پایین دست است. هسته قائم مرکزی متشکل از رس است که توسط دو لایه قائم از مصالح شن و ماسه ای خوب متراکم شده پوشانده شده و در بالادست و پایین دست این مجموعه نیز پوسته سد متشکل از سنگ آهک هوازده با تراکم پذیری بسیار زیاد قرار گرفته است [۱].

در این حالت خاص، نشست هسته رسی ممکن است منجر به محبوس شدن و در واقع آویزان شدن^۱ آن در بین مصالح پوسته بالادست و پایین دست شود و در واقع پدیده طاق زنی^۲ را ایجاد کند. تشخیص این پدیده در انتهای مرحله ساخت از مقایسه ارقام نشان داده شده توسط تنش سنج های نصب شده در قسمت های مختلف با مقادیر تنش اعمال شده متناسب با وزن خاکریز، امکان پذیر است. این پدیده در بسیاری از سدهای خاکی، بویژه اگر سرعت عملیات ساخت زیاد باشد و بین نشست پذیری مصالح هسته با مصالح اطراف اختلاف چشمگیری وجود داشته باشد، به چشم می خورد. از جمله در سد ۱۵ خرداد نیز در اوایل بهره برداری از سد ارقام قرائت شده توسط سیستم ابزار بندی سد، وقوع این پدیده را نشان داده است [۱۵]. از آنجا که وقوع پدیده طاق زنی ممکن است منجر به ایجاد ترک در سد گردد و در نهایت خطرهایی را پس از شروع بهره برداری در بر داشته باشد، بنابراین این موضوع باید مورد توجه خاص طراحان و سازندگان قرار گیرد. یکی از راه حل های رفع این مشکل، طراحی هسته سد به صورت شیب دار است.



شکل ۱۰-۳- نشست سد لا آنگوستورا - مکزیک در حین ساخت

۱۰-۳- تغییر شکل‌ها در حین آبگیری

در حین مرحله آبگیری ممکن است دو نوع تغییر شکل در سد خاکی رخ دهد:

- تغییر شکل‌های ناشی از افزایش بار آب روی بدنه

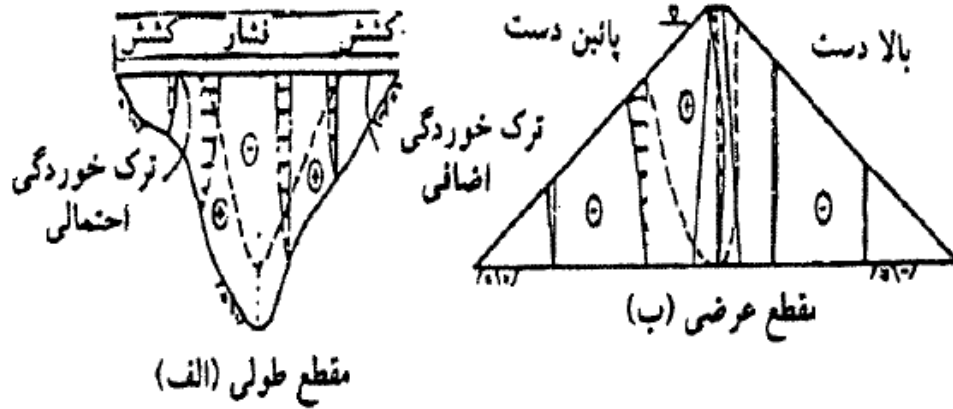
- تغییر شکل ناشی از تخریب ساختمان خاک در پوسته بالادست (رمبندگی^۱) بر اثر غرقاب شدن

الف- تغییر شکل ناشی از بار آب

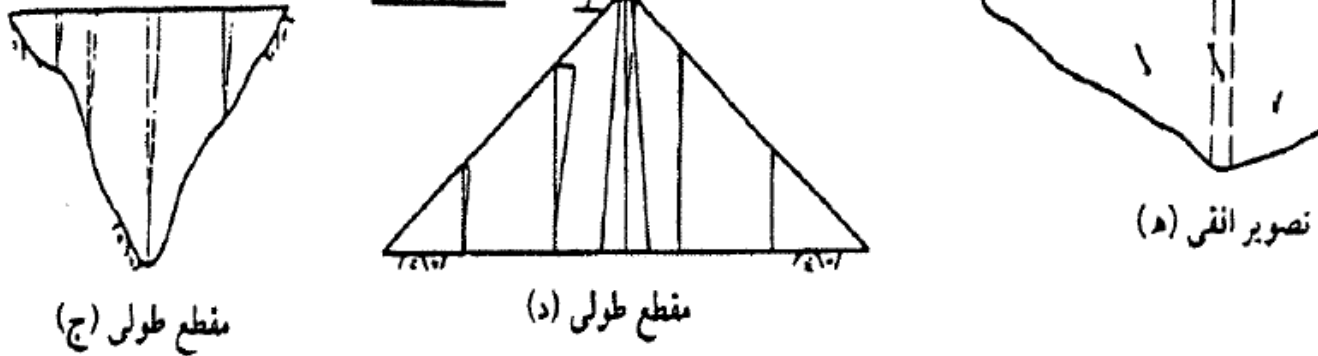
در حین اولین آبگیری مخزن سد، حداکثر تغییر شکل افقی و قائم در امتداد تاج و نیز در امتداد شیب‌های سد حادث می‌شود. چگونگی وقوع این تغییر شکل‌ها در شکل ۱۰-۴ نشان داده شده است.

همان‌طور که در قسمت "الف" از شکل مذکور دیده می‌شود، در نیمرخ طولی، مصالح به سمت وسط فشرده شده، در حالی که در جناحین دچار کشش می‌گردند و این امر ممکن است منجر به ایجاد ترک در حد فاصله دو منطقه کششی و فشاری شود.

حرکات افقی



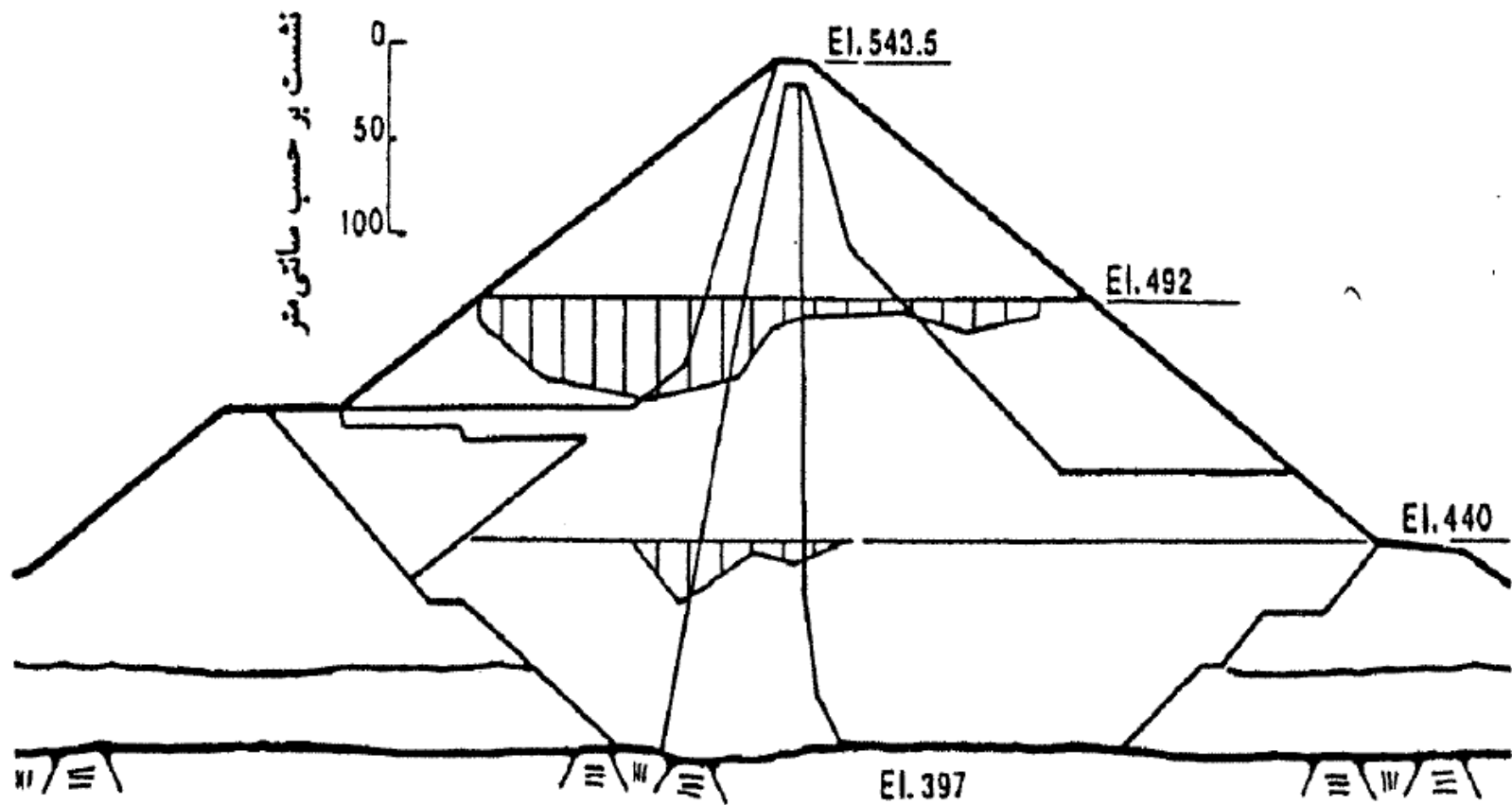
حرکات قائم



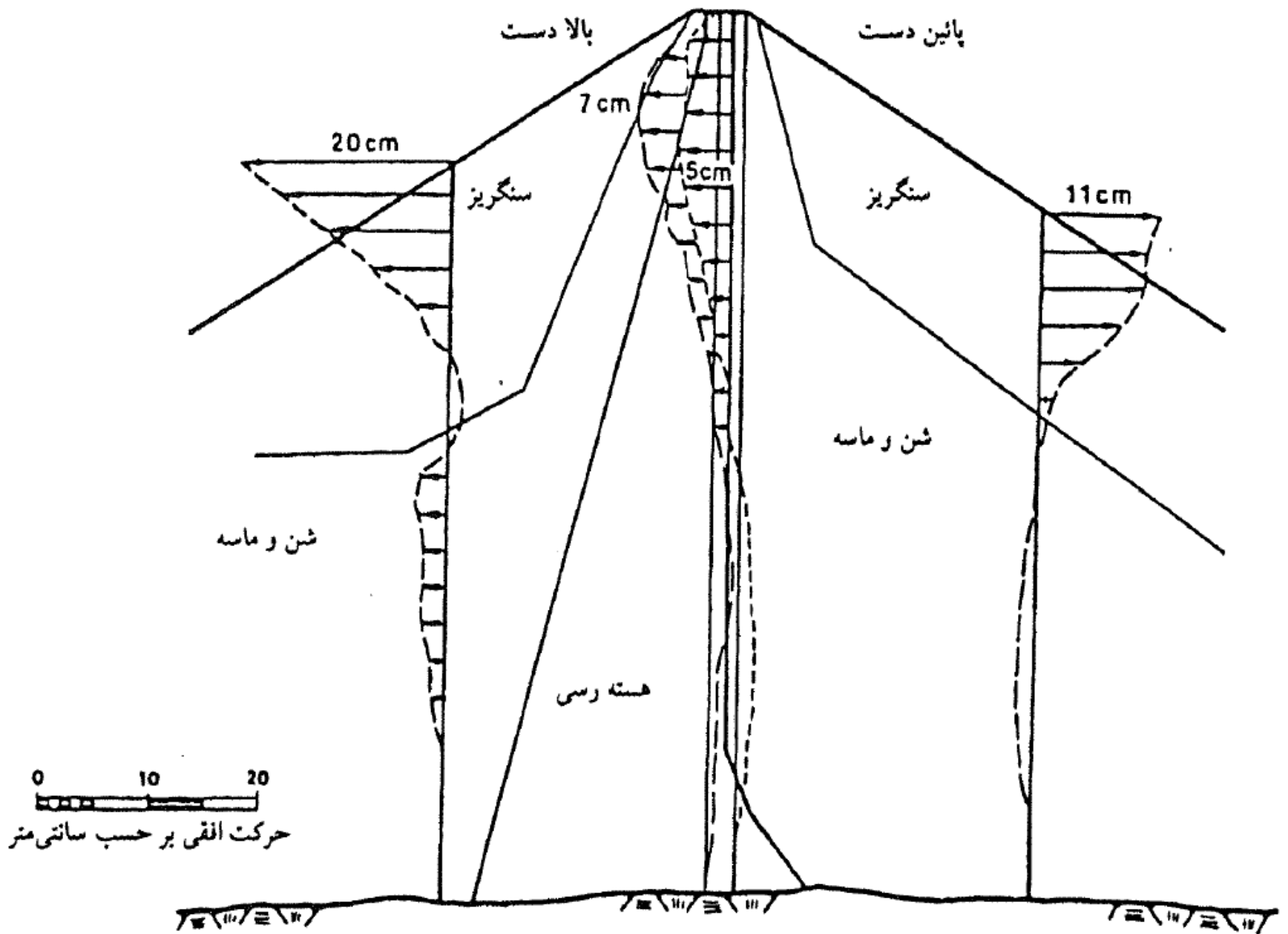
شکل ۱۰-۴- حرکات بدنه سد طی مرحله آبگیری مخزن

در سدهای منطقه بندی شده (غیر همگن)، اختلاف میزان حرکت بین مصالح مختلف ممکن است در حین اولین آبگیری سد حادث شود. برای نمونه، در طی اولین آبگیری سد لا آنگوستورا در مکزیک، حرکت قائم قابل توجهی در پوسته سنگریز بالادست سد ایجاد شد که چگونگی آن در شکل ۱۰-۵ نشان داده شده است [۱].

در واقع، فشرده شدن مصالح سنگریز پوسته بالادست به معنی آن است که بدنه سد در اثر بار ناشی از وزن آب به سمت بالادست حرکت کرده است (برای کسب اطلاعات بیشتر به منبع شماره ۱ مراجعه شود). البته پوسته پایین دست نیز به میزان کمتری حرکت کرده است. مقدار و تغییرات نسبی این حرکات افقی مصالح در بالادست و پایین دست سد مذکور، در شکل ۱۰-۶ نشان داده شده است.



شکل ۱۰-۵- نشست بدنه سد لا آنگوستورا در حین اولین آبگیری



شکل ۱۰-۶- حرکات افقی مصالح بالادست و پایین دست سد لآنگوستورا

ب - نشست ناشی از رمبندگی مصالح

مصالح متراکم شده به میزان کم و تحت رطوبت‌های کمتر (کمتر از رطوبت بهینه بنابر استاندارد پراکتور)، بر اثر اشباع شدن تمایل به رمبندگی یا تخریب ساختمان دارند. این پدیده می‌تواند در هر نوع مصالح اعم از سنگریز، ماسه، سیلت و رس رخ دهد. مصالح با دانه‌بندی خوب، کمتر از مصالح با دانه‌بندی یکنواخت تمایل به رمبندگی دارند، اما به‌طور کلی مهمترین عوامل مؤثر بر پدیده رمبندگی را می‌توان به شرح زیر برشمرد:

(۱) تراکم اولیه

(۲) مقدار رطوبت تراکم

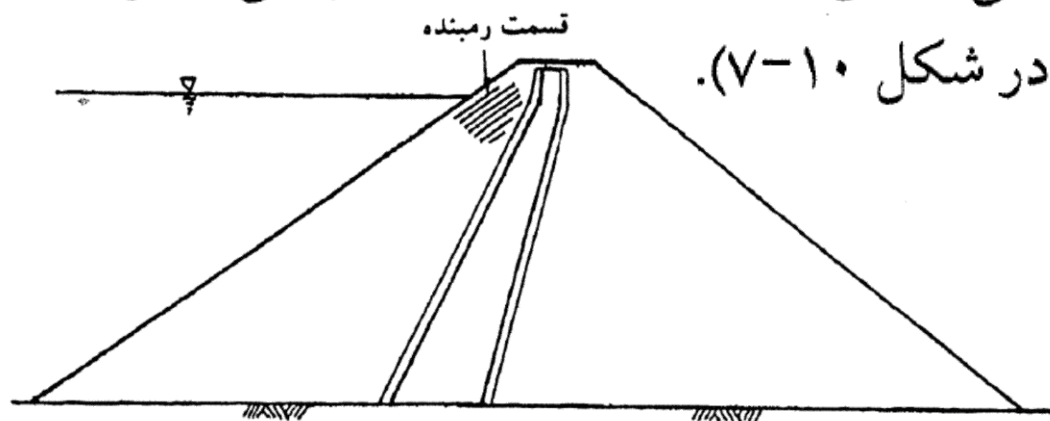
(۳) دانه‌بندی مصالح

همان طور که در فصل هفدهم خواهیم دید، معمولاً پوسته بالادست سدهای سنگریز ممکن است به یکی از دو صورت زیر اجرا شوند:

- مصالح ریخته شده به صورت غرقاب^۱

- مصالح متراکم شده به صورت خشک^۲

این مصالح در اولین آبیگری مخزن به علت غرقاب شدن تمایل به رمبندگی و نشست دارند. از آنجا که معمولاً لایه های تحتانی پوسته نسبت به لایه های بالاتر از تراکم بیشتری برخوردارند، از این رو در انتهای مرحله ساخت و به دنبال اولین آبیگری مخزن سد، بیشترین حرکات ناشی از رمبندگی ممکن است در قسمت های فوقانی و نزدیک تاج سد رخ دهد (منطقه هاشور زده در شکل ۱۰-۷).



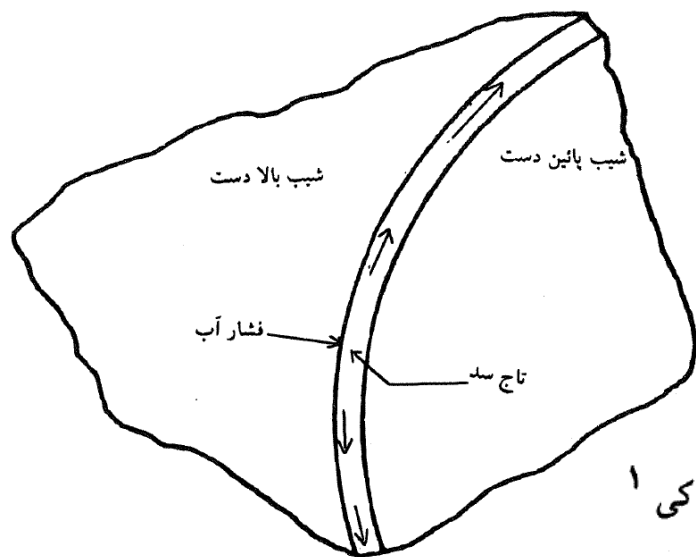
شکل ۱۰-۷- ناحیه مستعد نشست ناشی از رمبندگی در اثر آبیگری سد

نشست ناشی از رمبندگی در پوسته بالادست ممکن است منجر به دو پدیده زیر شود:

(۱) حرکت مختصر تاج سد به سمت بالادست

(۲) ایجاد ترک طولی در امتداد حاشیه بالادست هسته یا منطقه فیلتر

از آنجا که در نزدیکی تکیه گاه‌های جانبی سد بر اثر تغییر شکل‌های کششی، تنش‌های افقی کمتری حاصل می‌شود (همان‌طور که قبلاً تشریح شد)، از این رو در بعضی از سدها به منظور حفظ فشار محوری در هسته، ممکن است محور سد به صورت قوسی به سمت بالا دست (مطابق شکل ۸-۱۰) طراحی و اجرا شود. البته بسیاری از مهندسان هنوز به آثار مثبت این روش بجز در مواردی که هسته سد نازک و دره باریک باشد، اعتقاد نیافته‌اند.

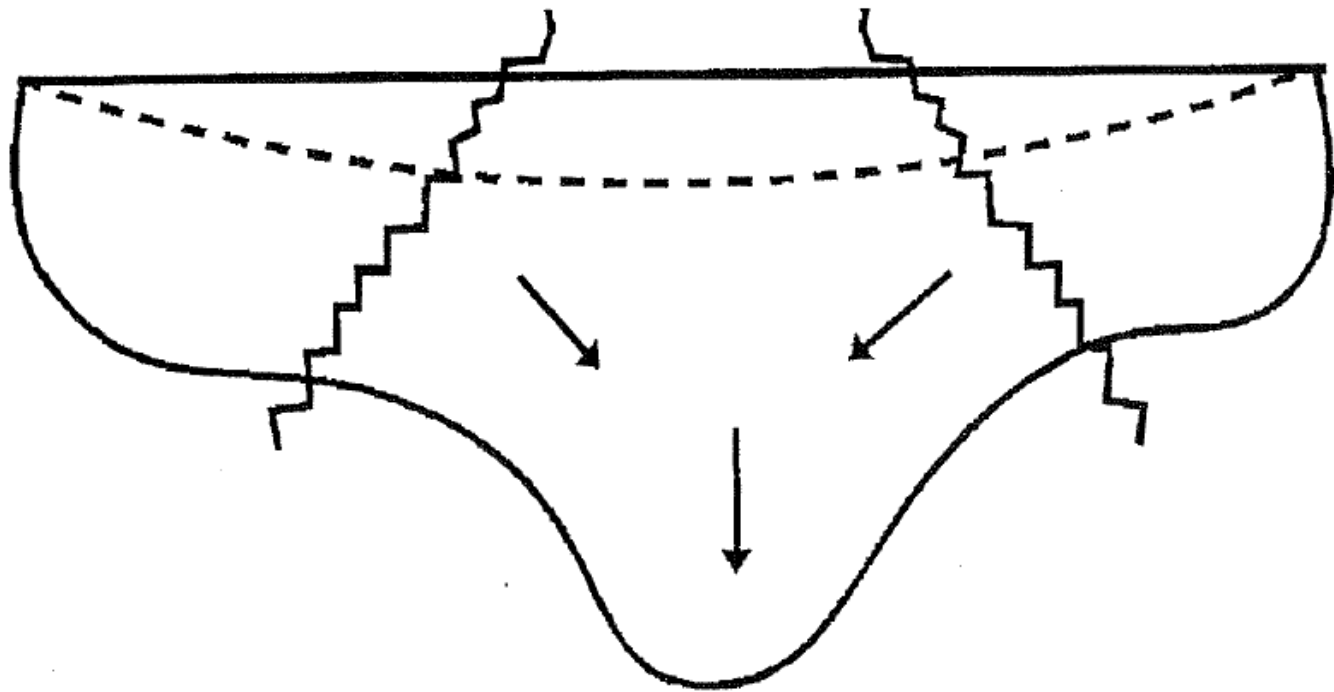


شکل ۸-۱۰- ایجاد قوس در محور سد خاکی^۱

۱۰-۴- تغییر شکل های بلندمدت

تغییر شکل های بلندمدت در تمام سدهای خاکی می تواند بنا به علل زیر رخ دهد:

- تحکیم مصالح رسی
- خزش کلیه مصالح شامل رس تا سنگریز



شکل ۱۰-۹- جهت حرکات عمومی مصالح در نیمرخ عرضی سد

در سدهای خاکی و سنگریز، امکان وقوع هر دو نوع ترک طولی و عرضی به واسطه تغییر شکل‌های حاصله در بدنه و پی سد وجود دارد و ترک‌ها ممکن است به صورت درونی یا بیرونی رخ دهند. ترک‌های عرضی خطرناک‌ترین نوع می‌باشند، چرا که این نوع ترک در صورت وقوع، معبر مناسبی برای جریان مستقیم آب از بالادست به پایین دست ایجاد می‌کند و ممکن است منجر به فرسایش شدید مصالح بدنه و در نهایت تخریب آن شود. در حال حاضر، در مورد ایجاد تغییر شکل‌های نسبی و وقوع ترک در سدهای خاکی اطلاعات کمی چندانی وجود ندارد. تحقیقات انجام شده توسط لئونارد^۱ و نارائین^۲ (۱۹۶۳) اطلاعاتی را در این زمینه به دست می‌دهد. این محققان با استفاده نمونه از مصالح چندین سد خاکی نمونه‌های منشوری آنها را به صورت تیر مورد آزمایش بارگذاری خمشی قرار داده و حساسیت آنها را نسبت به ترک خوردن ارزیابی کردند [۷]. آجاز^۳ و پاری^۴ نیز در سال ۱۹۷۵ آزمایش‌های مشابهی را انجام دادند و نتیجه گرفتند که تغییر شکل نسبی در مرحله گسیختگی با افزایش رطوبت تراکم خاک، افزایش می‌یابد [۱].

شکل ۱۰-۱۱ چگونگی روش انجام این آزمایش را نشان می‌دهد.

جدول ۱۰-۱- تغییر شکل نسبی کششی در اولین ترک خوردگی [۷]

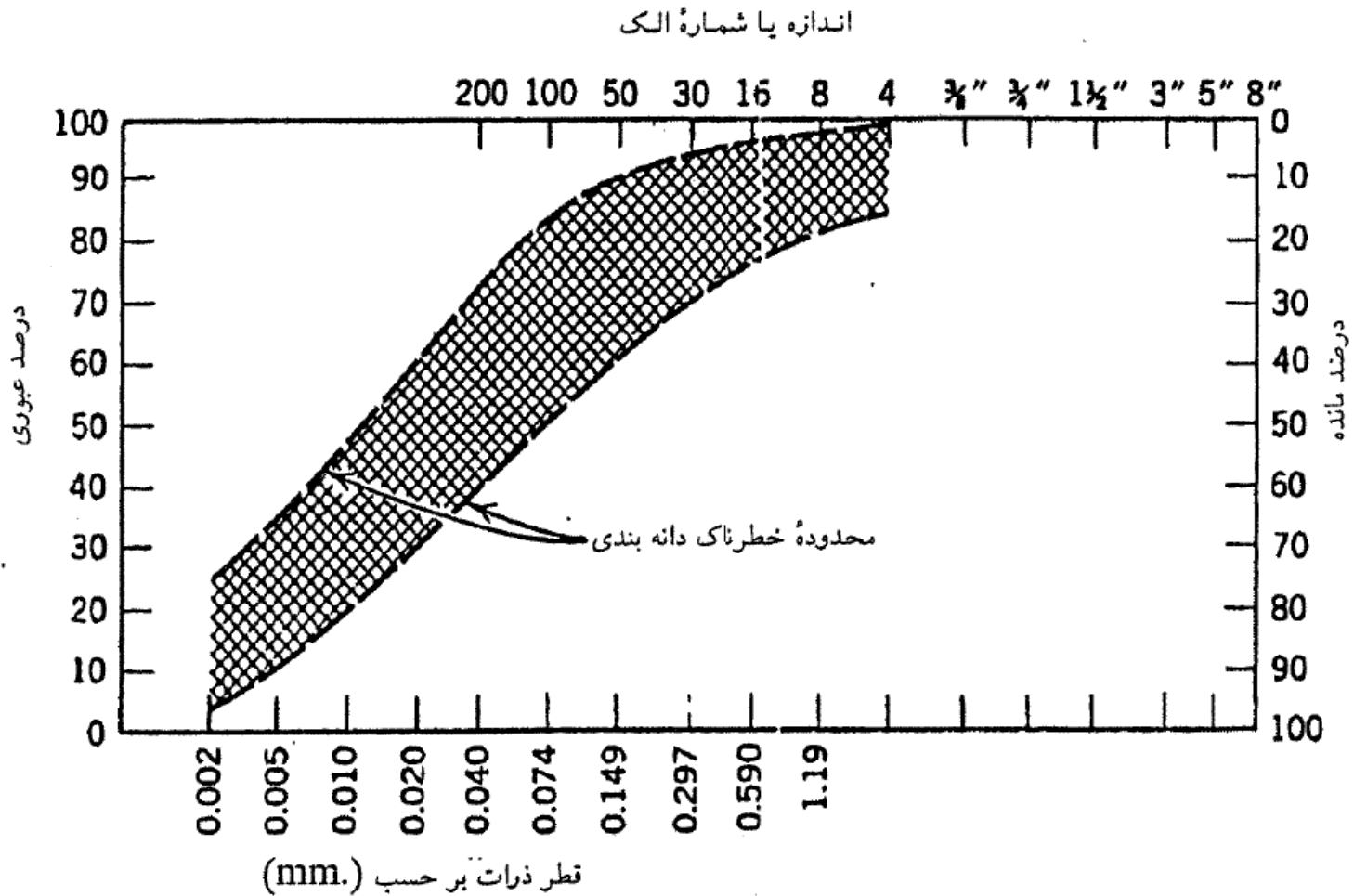
تغییر شکل نسبی کششی (%)	نوع مصالح
۰/۱۹	SM
۰/۱۷	SC
۰/۲۴	SM
۰/۰۷ *	SM
۰/۲۴	SM

* زمان آزمایش ۲ روز - برای سایر آزمایش ها ۴ هفته

نتایج آزمایش‌های انجام‌شده بر روی رس‌های با خمیرایی زیاد با تغییرات رطوبت از ۲-۳ درصد کمتر تا بیشتر از رطوبت بهینه با استفاده از روش‌های تراکم استاندارد و استاندارد اصلاح شده، نشان می‌دهند که در خاک‌های متراکم‌شده در رطوبت کمتر از بهینه، با افزایش رطوبت، انعطاف‌پذیری خاک به میزان زیادی افزایش می‌یابد، درحالی‌که برای خاک‌های متراکم‌شده در رطوبت بیشتر از بهینه، افزایش رطوبت اثر چندانی بر افزایش انعطاف‌پذیری خاک ندارد. بر اساس همین تحقیقات، نتیجه شد که خاک‌های با خمیرایی زیاد، انعطاف‌پذیرتر از خاک‌های با خمیرایی کم می‌باشند [۷].

بنابراین برای جلوگیری از ترک خوردگی خاک‌های رسی یا کاهش حساسیت آنها نسبت به این پدیده، بهتر است که تراکم خاک، در رطوبت بهینه یا بیشتر از آن صورت گیرد. البته این امر منجر به افزایش فشار آب منفذی در سد می‌شود که خود کاهش پایداری آن را به دنبال دارد، از این رو مهندس طراح لازم است بین این دو مسئله، یعنی کاهش پتانسیل ترک خوردگی با افزایش رطوبت تراکم نسبت به بهینه و پذیرش فشار آب منفذی بیشتر یا کاهش رطوبت تراکم نسبت به بهینه و پذیرش خطر ایجاد ترک خوردگی در مقابل کاهش فشار آب منفذی و پایداری بیشتر، اتخاذ تصمیم کند. یکی از روش‌های مناسب و بینابینی، این است که لایه‌های تحتانی مصالح در رطوبت کمتر از بهینه، و لایه‌های بالاتر در رطوبت بیشتر از بهینه متراکم شوند.

شرارد و همکاران (۱۹۶۷)، محدوده دانه بندی مصالح حساس به ترک خوردگی را تهیه کردند (شکل ۱۰-۱۳). این مصالح عمدتاً دارای خمیرایی کم تا متوسط می باشند [۱۲].



شکل ۱۰-۱۳- محدوده دانه بندی مصالح حساس به ترک خوردگی [۱۲]

۱۰-۶- محاسبه تغییر شکل‌ها

برای محاسبه تغییر مکان قائم در یک نقطه مانند P (شکل ۱۰-۲۰) در روی محور یک سد خاکی، می‌توان از رابطه ۱۰-۲ به شرح زیر استفاده کرد:

$$\rho = I \left[\frac{z}{H}, \frac{h}{H} \right] \frac{\gamma H^2}{E} \quad (10-2)$$

که در آن H و h و z در روی شکل ۱۰-۲ نشان داده شده و بقیه عوامل عبارتند از:

γ = وزن واحد حجم مصالح بدنه سد

E = مدول یانگ برای مصالح بدنه سد

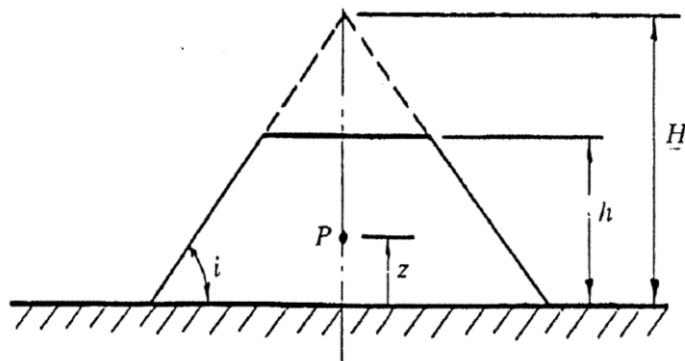
z = ارتفاع نقطه مورد نظر

h = ارتفاع لایه در مقطع مورد بررسی

H = حداکثر ارتفاع بدنه سد (اگر مقطع مثلثی فرض شود)

I = ضریب تأثیر که مقدار آن به‌ازای مقادیر مختلف شیب بدنه (i)، و ضریب پواسون

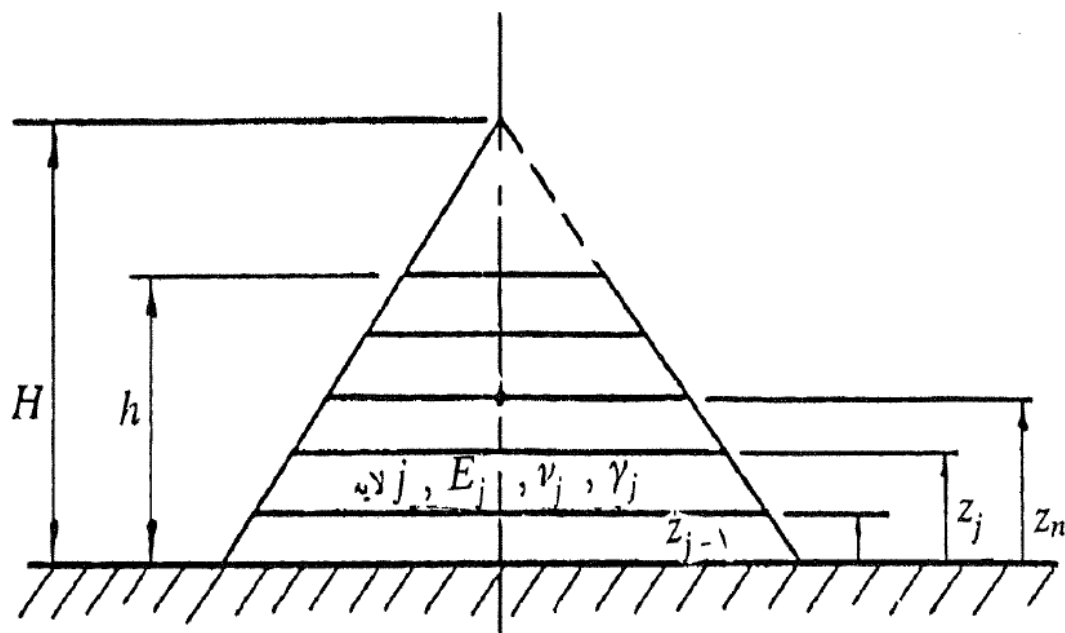
مصالح (ν) در شکل‌های ۱۰-۲۲ و ۱۰-۲۳ ارائه شده است [۱۳].



شکل ۱۰-۲۰- مقطع عرضی سد همگن

چنانچه بدنه سد خاکی از لایه‌های مختلف ساخته شده باشد، مقدار نشست یک لایه منفرد در نقطه مفروض N ، به فاصله z_n در بالای سطح قاعده سد به طور تقریبی از رابطه زیر تعیین می‌شود (شکل ۱۰-۲۱):

$$\rho(z_n, h) = \sum_{j=1}^n \left[I(z_j, h) - I(z_{j-1}, h) \right] \frac{\gamma_j H^2}{E_j} \quad (3-10)$$



شکل ۱۰-۲۱ - سیستم لایه بندی بدنه سد

۱۰-۷- حرکات ناشی از بار آب

تغییر شکل‌ها و حرکات ناشی از بار آب، بر اساس نظریه‌های موجود در روابط تنش - کرنش قابل محاسبه است. چنانچه ارتفاع آب در پشت سد خاکی برابر h و نسبت عرض تاج به عرض قاعده و نیز ارتفاع سد به عرض تاج آن به ترتیب معادل روابط زیر فرض شود:

$$\frac{B_2}{B_1} = 0.2$$

$$\frac{H}{B_2} = 1.0$$

در این صورت، می‌توان بر اساس رابطه زیر مقدار حرکات ایجادشده در یک سد خاکی همگن را در دو جهت افقی و قائم محاسبه کرد:

$$\rho = I(x \text{ یا } z) \cdot \frac{\gamma_w \cdot H^2}{64E} \quad (10-4)$$

که در آن :

$$B_2 = \text{عرض تاج سد}$$

$$B_1 = \text{عرض قاعده سد}$$

$$h = \text{ارتفاع آب در پشت سد}$$

$$H = \text{ارتفاع کلی سد}$$

$$\gamma_w = \text{وزن واحد حجم آب}$$

$$E = \text{مدول الاستیسیته مصالح بدنه سد}$$

$$I_x = \text{ضریب تأثیر حرکت افقی}$$

$$I_z = \text{ضریب تأثیر حرکت قائم}$$

$$\rho = \text{مقدار حرکت در هریک از جهات افقی و قائم}$$

مقادیر ضریب تأثیر I ، با استفاده از جدول ۱۰-۲ قابل تعیین است.

جدول ۱۰-۲- مقادیر ضریب تأثیر I برای محاسبه حرکات قائم و افقی ناشی از بار آب

ضریب تأثیر برای حرکت قائم I_z			ضریب تأثیر برای حرکت افقی I_x			$\frac{h}{H}$
۰/۴۸	۰/۴	۰/۳	۰/۴۸	۰/۴	۰/۳	ضریب پواسون (۱/)
-۰/۰۳	-۰/۰۲	-۰/۰۱	۰/۰۷	۰/۰۵	۰/۰۲	۰/۲۵
-۰/۸۳	-۰/۲۳	-۰/۰۹	۰/۷۲	۰/۵۶	۰/۲۸	۰/۵۰
-۱/۳۲	-۰/۹۵	-۰/۳۸	۲/۹۴	۲/۱۷	۱/۲۰	۰/۷۵
-۳/۵	-۱/۸۷	-۰/۶۶	۸/۰۴	۵/۹۰	۳/۱۵	۱/۰