بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه صنعتی اصفهان
دانشکده مهندسی معدن

مدل سازی عددی تحلیل پایداری بلوکی پی سنگ سد ها- مطالعه ی موردی سد رودبار لرستان

پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک سنگ

حمید رضا صداقتی

اساتید راهنما
دکتر علیرضا باغبانان
دکتر حمید هاشم‌الحسینی

۱۳۹۱

دانشگاه صنعتی اصفهان
دانشکده مهندسی معدن

پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد رشته‌ی مهندسی مکانیک سنگ آقای حمید رضا صداقتی

تحت عنوان

مدل سازی عددی تحلیل پایداری بلوکی پی سنگ سد ها- مطالعه ی موردی سد رودبار لرستان

در تاریخ ۱۳۹۱/۱۱/۳ توسط کمیته تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

۱- استاد راهنمای اول پایان نامه	دکتر علیرضا باغبانان
۲- استاد راهنمای دوم پایان نامه	دکتر حمید هاشم‌الحسینی
۳- استاد مشاور	دکتر مسعود چراغی
۴- استاد مشاور صنعتی	مهندس مرتضی رحیمی
۵- استاد داور داخلی	مهندس سعید مهدوری
۶- استاد داور خارجی	دکتر محمود هاشمی اصفهانیان
سرپرست تحصیلات تکمیلی	دکتر راحب باقرپور

تشکر و قدردانی

سپاس خدای را که سخنوران، در ستودن او بمانند و شمارندگان، شمردن نعمت های او ندانند و کوشندگان، حق او را گزاردن نتوانند. و سلام و درود بر محمّد و خاندان پاک او، طاهران معصوم، هم آنان که وجودمان وامدار وجودشان است؛ و نفرین پیوسته بر دشمنان ایشان تا روز رستاخیز...

بدون شک جایگاه و منزلت معلم، اجلّ از آن است که در مقام قدردانی از زحمات بی شائبه ی او، با زبان قاصر و دست ناتوان، چیزی بنگاریم.

اما از آنجایی که تجلیل از معلم، سپاس از انسانی است که هدف و غایت آفرینش را تامین می کند و سلامت امانت هایی را که به دستش سپرده اند تضمین؛ بر حسب وظیفه و از باب "من لم یشکر المنعم من المخلوقین لم یشکر الله عزّ و جلّ: "

از پدر و مادر عزیزم، این دو معلم بزرگوارم، که همواره بر کوتاهی و درشتی من، قلم عفو کشیده و کریمانه از کنار غفلت هایم گذشته اند و در تمام عرصه های زندگی یار و یاوری بی چشم داشت برای من بوده اند؛

از اساتید بی بدیل و شایسته؛ جناب آقای دکتر علیرضا باغبانان و جناب آقای دکتر سید حمید هاشم الحسینی که در کمال سعه صدر، با حسن خلق و فروتنی، از هیچ کمکی در این عرصه بر من دریغ ننمودند و زحمت راهنمایی این رساله را بر عهده گرفتند؛

از استاد صبور و باتقوا، جناب آقای مهندس مرتضی رحیمی، مدیر گروه ژئوتکنیک و تونل شرکت مهندسی سپاسد، که زحمت مشاوره این رساله را در حالی متقبل شدند که بدون مساعدت ایشان، این پروژه به نتیجه مطلوب نمی رسید؛ کمال تشکر و قدردانی را دارم.

باشد که این خردترین، بخشی از زحمات آنان را سپاس گوید.

حمید رضا صداقتی

زمستان ۱۳۹۱

کلیه‌ی حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات، ابتکارات و نوآوری‌های ناشی از تحقیق موضوع این پایان‌نامه (رساله) متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است.

به پاس تعبیر عظیم و انسانی شان از کلمه ایثار و از خودگذشتگان

به پاس عاطفه سرشار و گرمای امید بخش وجودشان که در این سردترین روزگاران بهترین پشتیبان است

به پاس قلب های بزرگشان که فریادرس است و سرگردانی و ترس در پناهشان به شجاعت می گراید

و به پاس محبت های بی دریغشان که هرگز فروکش نمی کند

پدر و مادر عزیزم

و به پاس زیبایی حضور خواهر و برادرم در کنارم، که خستگیهای این راه را به امید و روشنی راه تبدیل کرده و امیدوارم بتوانم در آینده ی نزدیک جوابگوی این همه محبت آنها باشم

این مجموعه را با نهایت اخلاص به پدر، مادر و خواهر و برادر عزیزم تقدیم می کنم . . .

فهرست مطالب

فهرست مطالب هشت

چکیده ۱

فصل اول: مقدمه و ضرورت تحقیق

۱-۱ مقدمه ۲

۱-۲ پی سد ۳

۱-۳ عوامل ایجاد لغزش در پی ۴

۱-۴ ضرورت تحقیق ۵

فصل دوم:پی های سنگی سد و روشهای تحلیل پایداری آنها

۲-۱ مقدمه ۷

۲-۲ پی سنگی سدها و اهمیت آنها ۸

۲-۳ عوامل تحدید کننده پایداری پی در سد ۸

۲-۳-۱ نشست نامتقارن ۹

۲-۳-۲ فشار آب منفذی ۱۰

۲-۴ تحلیل پایداری پی های سنگی سد ۱۱

۲-۴-۱ روش های محاسباتی ۱۵

۲-۴-۲ روش های تحلیلی محاسبه ظرفیت باربذیری ۱۹

۲-۴-۳ مدل سازی فیزیکی ۲۴

۲-۴-۴ مدل سازی عددی ۲۹

فصل سوم: مشخصات کلی سد و منطقه رودبار لرستان

۳-۱ مقدمه ۴۰

۳-۲ زمین شناسی مهندسی محل سد ۴۲

۳-۲-۱ زمین ریخت شناسی ۴۲

۳-۲-۲ سنگ بستر ۴۲

۳-۲-۳ گسلهای محدوده محور سد ۴۳

۳-۲-۴ شکستگی های اصلی محدوده ی محور سد ۴۵

۳-۲-۵ برداشت های انجام شده در منطقه ی پی ۵۱
۳-۲-۶ مشخصات فیزیکی وژئومکانیکی ساختگاه پی ۵۴
۳-۳ مشخصات بدنه سد رودبار لرستان ۵۹

فصل چهارم:مدل سازی عددی پی سنگ سد رودبار لرستان با استفاده از روش المان مجزا

۴-۱ مقدمه ۶۳
۴-۲ نرم افزار مورد استفاده ۶۴
۴-۳ ساخت هندسه مدل ۶۵
۴-۳-۱ ابعاد مدل ۶۵
۴-۳-۲ هندسه ناپیوستگی ها ۶۶
۴-۳-۳ ایجاد شبکه شکستگی های پی ۶۸
۴-۴ اعمال شرایط مرزی و تنش های اولیه ۷۰
۴-۵ مدل های رفتاری ۷۴
۴-۶ تحلیل استاتیکی مدل ۷۵
۴-۶-۱ تحلیل نتایج در حالت خشک ۷۶
۴-۶-۲ تحلیل مدل در حالت اشباع ۸۳

فصل پنجم: تحلیل دینامیکی

۵-۱ مقدمه ۸۹
۵-۲ زلزله های مبنای طراحی برای سد ها ۹۰
۵-۳ پارامتر های ارتعاشی زمین-بیشینه شتاب زمین ۹۱
۵-۳-۱ روش های احتمالی در برآورد شتاب بیشینه زمین ۹۲
۵-۴ انتخاب زمین لرزه مورد استفاده در طراحی با استفاده از تطابق مقادیر PGA ۹۵
۵-۵ مدل سازی پی سد رودبار لرستان در حالت دینامیکی ۹۷
۵-۵-۱ مشخصات دینامیکی پی سد رودبار لرستان ۹۷
۵-۵-۲ ساخت هندسه مدل و اعمال شرایط مرزی ۹۸

۵-۵-۳ بارگذاری دینامیکی ۱۰۱
۵-۵-۴ عبور موج از میان مدل ۱۰۴
۵-۵-۵ میرایی مکانیکی ۱۰۵
۵-۵-۶ تحلیل نتایج مدل سازی دینامیکی ۱۰۹
۵-۵-۷ اثر حضور آب در تحلیل دینامیکی ۱۱۵

فصل ششم:نتیجه گیری و پیشنهادات

۶-۱ بحث و نتیجه گیری ۱۱۹
۶-۲ نتایج ۱۱۹
۶-۳ پیشنهادات ۱۲۱

منابع **۱۲۲**

چکیده

اکثر تحلیل های انجام گرفته بر روی پی های سنگی در شرایط محیط پیوسته یا معادل پیوسته انجام می گیرد. این در حالی است که یک محیط سنگی همواره شامل ناپیوستگیهای متعددی می باشد که بلوک های زیادی را درآن محیط تشکیل داده است. روش المان مجزا این امکان را فراهم می سازد که علاوه بر جابجاییهای کلی توده سنگ، جابجاییهای بین بلوک های موجود نیز دیده شود. این گونه جابجایی ها در پی یک سد می تواند عامل به وجود آمدن نشستهای نامتقارنی در قسمت های مختلف پی باشد و پایداری سد را تحت تاثیر قرار دهد. چنین نشست هایی در صورت وجود فشار آب منفذی در یک طرف سد افزایش می یابد. به گونه ای که فشار آب منفذی عاملی برای برخاستن بلوک ها در یک طرف سد و عامل تهدید کننده مهمی برای پایداری سد می باشد. علاوه بر این بار های دینامیکی تاثیراتی بر روی محیط های ناپیوسته دارد که با مدل سازی پیوسته نمی توان آنها را بررسی نمود. نیرو های دینامیکی از جمله زمین لرزه نیز باعث نوسان بلوک ها شده که این امر عامل مهمی در ناپایداری سازه مورد نظر می باشد. در این تحقیق با استفاده از اطلاعات حاصل از برداشت در منطقه پی سد رودبار لرستان به مدل سازی عددی و بررسی نتایج پرداخته می شود. در ابتدا به ساخت مدلی با مشخصات معادل پیوسته پرداخته می شود و منطقه ای که بیشترین نشست در آن اتفاق می افتد محاسبه می گردد پس از آن مدل سازی در حالت ناپیوسته با استفاده از روش المان مجزا برای منطقه دارای بیشترین میزان نشست انجام خواهد شد و سایر قسمت های پی با استفاده از مشخصات محیط معادل، مدل سازی می گردد. به علت کاهش عدم قطعیت در نتایج تحلیل ها، از ۹ مدل با ۹ شبکه شکستگی مختلف برای حالت ناپیوسته استفاده می گردد. کلیه مراحل ذکر شده هم برای محیط خشک و هم برای محیط اشباع انجام خواهد شد. علاوه بر این به تحلیل دینامیکی پی با استفاده از زلزله مبنای طرح (Design Basis Earthquake) با استفاده از زلزله پارکفیلد پرداخته خواهد شد. و نوسان سطح پی در قسمت های مهم قرار گرفته زیر هسته پی در دو حالت خشک و اشباع محاسبه خواهد شد. نتایج به دست آمده عدم هماهنگی محیط پیوسته و ناپیوسته را در محاسبه نشست ها به خوبی نشان می دهد. همچنین نامتقارنی در نشست های پی، ناشی از فشار آب منفذی که در اثر بالا زدن بلوک های تشکیل دهنده پی در قسمت بالا دست می باشد، نشان داده خواهد شد. نتایج مدل سازی در حالت دینامیکی نیز بیشترین نوسان را برای قسمت های حیاتی پی در هر دو حالت خشک و اشباع نشان می دهد، همچنین تاثیر فشار آب منفذی را در نوسان سطوح درزه به خوبی مشخص می نماید.

فصل اول
مقدمه و ضرورت تحقیق

۱-۱- مقدمه

ساخت یک سد وضعیت تنش طبیعی را در یال های دره و مسیر رودخانه به طور اساسی دگرگون می سازد. بار کم و بیش متمرکز و قائم ناشی از وزن سد موجب مجموعه ی پیچیده ای از نیروهای فشاری می کند. سد نیروهای حاصل از بار های متغیر (بار آب، اثرات دما و غیره) را در طول عمر خود به پی منتقل می سازد. این نیروها در عین حال باعث ایجاد تنش های فشاری ، برشی و غالبا تنش های کششی به سمت بالادست می شوند. آب تحت فشار به داخل حفره ها و ترک های پی سنگ تراوش می کند که فشار آن نیروهای درونی را ایجاد می کند که ممکن است قابل ملاحظه و به بزرگی سایر نیروها بوده و بدتر از آن در راستایی عمل کند که برای پایداری نامطلوب باشد [۱].

برای حل مسائل مربوط به پی های تراوا یا ضعیف می توان از راه حلهای نظری بر مبنای اصول مکانیک خاک و مکانیک سنگ استفاده کرد ولی مدل کردن کامل بدنه ی سد و پی آن و نیز تعیین دقیق مقاومت و تراوایی مصالح مختلف و محدوده ی تغییرات آنها دشوار است. بنابراین قضاوت فنی نقش بسیار مهمی در کاربرد نظریه ها در عمل دارد [۲].

۱-۲- پی سد

اصطلاح پی به صورتی که در این مجموعه به کار خواهد رفت به مفهوم کف دره است که سد بر روی آن قرار می گیرد. دو شرط اصلی برای پی یک سد خاکی ایجاد تکیه گاه پایدار برای سد در کلیه شرایط اشباع و بارگذاری و ناتراوایی کافی برای جلوگیری از تراوش بیش از اندازه ی آب هستند. اگر چه پی به مفهوم واقعی کلمه طراحی نمی شود ولی در طراحی تمهیدات خاصی در نظر گرفته می شود تا از تحقق نیازهای اساسی طرح توسط آن اطمینان حاصل گردد. مشخصات و مشکلات هر پی منحصر به همان پی و متمایز از دیگر پی ها بوده و راه حل های اصلاح و آماده سازی مختص به خود را طلب می کند. روش های گوناگون تثبیت پی های ضعیف، کاهش تراوش از پی های تراوا، شکل دهی پی به منظور کاهش نشست های ناهمگون به حد قابل قبول و نوع و محل تسهیلات کاهش تراوش به شرایط خاص هر محل بستگی داشته و باید بر اساس شرایط خاص آن انتخاب شود [۲].

پی ها را بر اساس مشخصه های غالب آنها می توان به سه گروه طبقه بندی کرد

- پی های سنگی
- پی های متشکل از مصالح درشت دانه (شن وماسه)
- پی های متشکل از مصالح ریز دانه (سیلت و رس)

پی های سنگی معمولا مستحکم ترین نوع پی به حساب می آیند. حتی پی های تشکیل شده از سنگ های ضعیف عموما به پی های خاکی ارجعیت دارند. ترجیح پی سنگی بدون شک قابل توجیه است زیرا توده سنگ معمولا همگن و مستحکم است. چون پی های سنگی دارای درز و ترک های بیشمار و گسله می باشند، باید به اندازه کافی مورد شناسایی قرار گیرند تا مشخص شود که از استحکام کافی برخوردارند [۲].

رفتار مکانیکی درزه های پی سد نقش مهمی را در مهندسی سد ها بازی می کند. از آنجایی که آنها ضعیف ترین قسمت ساختار می باشند و در نتیجه روند تکامل ترک که در امتداد درزه اتفاق می افتد تعیین کننده ی مقدار ظرفیت تحمل بار کلی می باشد [۳].

مطالعات اخیر نشان دهنده ی آن است که ۱۲ درصد شکست سد ها و حدود ۴۰ درصد سوانح مربوط به سد ها را می توان به پی آنها نسبت داد. این ارقام بیانگر اهمیت درک شرایط پی سد است [۲]. با توجه به این نکته کاملا روشن است که پی یک سد بیشترین نقش را در پایداری یک سد ایفا می کند. لذا بررسی و مطالعه ی عواملی که باعث ایجاد ناپایداری در پی می شوند از اهمیت ویژه ای در یک فرایند طراحی برخوردارند.

۱-۳- عوامل ایجاد لغزش در پی

پی سد منبع پدیده های مختلف بوده است. حرکات بلوک های محدود به گسل ها، نشست های نامتقارن در اثر بارهای ناهمگن، تراوش از میان تکیه گاهها، و درگیری سد و پی می باشد. در بعضی مواقع یکی از این مسائل وضعیت بحرانی برای پروژه به وجود آورده است. این مسائل با استفاده از مشاهداتی که در سد های ساخته شده در مکزیکو انجام گرفته است مورد بحث واقع می شود.

تکیه گاه سمت چپ سد رکونا از توف رسی تشکیل می شود که دارای گسلی در امتداد لایه بندی آن می باشد. حرکت ها و لغزشی هایی در مورد این گسل در هنگام پر کردن دریاچه مشاهده شد. کارهایی که برای جلوگیری از لغزش و ترمیم وضعیت به وجود آمده انجام گرفت شامل ساخت یک گالری زهکشی و یک سد تکیه گاهی از سنگریزه در عرض کانال رودخانه بود. مشاهدات صحرایی که بعد از این ترمیم انجام گرفت، در مقایسه با مشاهدات قبلی، موثر بودن راه حلهای به کار برده شده را تایید کرد.

سد لازاروکاردیناس روی لایه ی ضخیم ریولیت و توف ریولیتی که به شدت گسلی بودند، ساخته شده بود. در هنگام آبگیری سد گسل های موجود توسط نیروی آب دریاچه فعال شدند. این فعالیت گسل ها منجر به حرکاتی در ساحل سمت چپ به سمت دریاچه گردید. زمین لرزه هایی نیز در رابطه با این موضوع گزارش گردید. برای حل این مشکل دو گالری زهکشی برای آزاد نمودن فشار های آب در درون سنگ پایین دست حفاری گردید.

اندازه گیریهایی که با شیب سنج و نشانه سنج ها در سد ۲ پروژه مالپاسو صورت گرفت، حرکت های بلوک ها را در پی، محصور بین ترک های مربوط به گسلی که در قسمت وسط سد، موازی با دره عبور می کند، نشان دادند. وجود سطح پیزومتری زیاد در قسمت چپ و کم در قسمت فرو رفتگی که در اثر تغییرات سطح دریاچه تغییر نموده است دلیل اصلی به وجود آمدن تغییر شکل ها در رسوبات شیلی بوده است [۴].

به طور کلی می توان گفت لغزش در پی در امتداد مسیر های دارای پتانسیل لغزش با دو عامل ایجاد می شود:

- اضافه بار بیش از بار هیدرواستاتیک طراحی شده در بالا دست به علت جاری شدن سیل
- تخریب تدریجی ناشی از مقاومت برشی ناپیوستگیها به علت نشست، تغییرشکل، آسیب، واکنش های ژئوشیمیایی بین مواد و آب در سطح ناپیوستگی [۵].

در رابطه با ظرفیت تحمل بار پی دو مشکل زیر مورد بررسی قرار می گیرد.

- مشکل لغزش در امتداد ناپیوستگی ها از قبل موجود فشرده شده
- مشکل شروع ترک و انتشار آن در امتداد یک فضای سالم [۳].

علاوه بر عوامل اشاره شده، پی های سد مازاد بر مشکلات طبیعی زمین شناسی و قابل مشاهده توپوگرافی ممکن است دارای مشکلات زیر باشند.

۱- وجود حفرات کارستی در عمق زمین

۲- وجود لایه های آبکش درلایه های زمین

۳- وجود گسلها و ترکهای نیمه فعال و فعال در مسیر و یا عمود بر محور سد در محل پی

۴- وجود لایه ها و توده های جابجا شده و یا مناطق خرد شده

۵- وجود لایه های ضعیف و نشست پذیر و یا قابلیت تورم در محل پی

۶- وجود لایه های خش لغزه ای در محل پی و جناحین سد [۶].

۱-۴- ضرورت تحقیق

نیرو های وارده به پی باعث تغییر شکل های متفاوتی در پی می شود. این تغییر شکل ها به چندین حالت می تواند در پی اتفاق افتد. یکی به حالت متقارن، یعنی هنگام اعمال نیرو های وارده، کل پی به یک اندازه جابجا شده و نشست می کند. این حالت زمانی اتفاق می افتد که تغییر شکل پذیری کل توده سنگ پی به یک اندازه بوده و میزان بار وارده به کل پهنه ی پی نیز نسبتا مساوی باشد که با توجه به ماهیت توده های سنگی این حالت بسیار نادر است. چرا که پی هر سد از مجموع توده سنگ هایی با خواص مکانیکی متفاوتی تشکیل شده است. این تفاوت ها شامل تفاوت در مدول تغییر شکل پذیری نیز می باشد که باعث تفاوت در تغییر شکل آنها تحت یک بار معین می شود.

حالت دوم حالتی است که تغییر شکل در پی به شکل نامتقارن ایجاد شود. مثلا ممکن است در یک پهنه ی پی توده سنگی با تغییر شکل پذیری کمتری نسبت به تغییر شکل پذیری توده سنگی دیگر که در پهنه ی دیگر پی واقع شده است وجود داشته باشد.در این حالت با اعمال بار های ناشی از وزن سد و نیروی هیدرواستاتیک آب و ... تغییر شکل های نامتقارنی در پی اتفاق افتد. این تغییر شکل ها به بدنه ی سد منتقل شده و ممکن است قسمتی از سد دچار گسیختگی شود.

حالت دیگری که باعث ایجاد بحران می شود این است که پرده ی آب بند به درستی اجرا نشده باشد یا به هر دلیلی به درستی کار نکند. در این صورت، هنگام آبگیری سد آب به منافذ پی نفوذ کرده و باعث ایجاد فشار زیادی به نام فشار آب برخاستی می شود. این فشار (نیرو) در جهت بلند کردن سازه ی سد از زمین عمل می کند. با افزایش سطح آب در بالادست این فشار نیز افزایش یافته تا جایی که ممکن است ناپایداری سد را به همراه داشته باشد.

تمامی حالات قبلی در شرایطی است که تمام نیرو ها به حالت استاتیکی می باشند. حالت بحرانی دیگری که پایداری را تحت تاثیر قرار می دهد ایجاد نیروهای دینامیکی از جمله زلزله می باشد [۷].

با توجه به مطالب گفته شده ضرورت انجام آنالیز پی توسط روشی که مبتنی بر محیط ناپیوسته باشد روشن می شود. در این پایان نامه هدف تحلیل پایداری پی سنگ سد رودبار لرستان توسط روش المان مجزا می باشد.در فصول بعدی ابتدا روشهای مورد استفاده برای تحلیل پایداری پی سدها که تاکنون استفاده شده است ارائه می گردد. پس از آن به معرفی کلی مشخصات منطقه ی رودبار لرستان که به منظور مدل سازی از آن استفاده می شود پرداخته می شود. در فصول ۴ و ۵ به تحلیل پایداری پی در حالت های مختلف و ارائه ی نتایج به دست آمده پرداخته می شود.و در آخر نیز نتایج کامل از این تحلیل آورده می شود.

فصل دوم
پی های سنگی سد و روشهای تحلیل پایداری آنها

۲-۱- مقدمه

بار تمامی سازه های متکی بر زمین مانند سدها باید توسط عنصری واسطه ای به نام پی تحمل شود. پی بخشی از یک سیستم مهندسی است که بار های تحمیلی و وزن خود را به سنگ زیرین و درون آن انتقال می دهد. به این ترتیب علاوه بر تنش های موجود در توده سنگ که از وزن خود سنگ ناشی می شود. تنش های دیگری نیز که ناشی از وزن سازه اصلی می باشد، به وجود می آید. به علت خاصیت نامتجانس سنگ و خاک حتی در مناطقی که مجاور همدیگرند به ندرت دو پی یکسان وجود دارد و از آنجایی که هر پی خطرات ناشناخته ها را در خود دارد، تحلیل های مختلفی نیز برای آنها وجود دارد [۸].

همانگونه که قبلا نیز اشاره شد اصطلاح پی که در این مجموعه به کار خواهد رفت به مفهوم کف دره است که سد بر روی آن قرار می گیرد. دو شرط اصلی برای پی یک سد خاکی ایجاد تکیه گاه پایدار برای سد در کلیه شرایط اشباع و بارگذاری و ناتراوایی کافی برای جلوگیری از تراوش بیش از اندازه ی آب هستند. در طراحی تمهیدات خاصی در نظر گرفته می شود تا از تحقق نیازهای اساسی طرح توسط آن اطمینان حاصل گردد. مشخصات و مشکلات هر پی منحصر به همان پی و متمایز از دیگر پی ها بوده و راه حل های اصلاح و آماده سازی مختص به خود را طلب می کند [۲].

به منظور بررسی و تحلیل پایداری پی سد باید با عوامل تهدید کننده ی پایداری آن آشنا بود.

۲-۲- پی سنگی سدها و اهمیت آنها

پی های سد به طور معمول نیاز بیشتری به مطالعه و تحقیق در مقایسه با سایر سازه ها از جمله ساختمان ها و پل ها دارد. این تحلیل ها اغلب به بررسی عوامل مخرب در پی ها و جناحین آن ها با استفاده از آزمون های آزمایشگاهی و برجا و همچنین تحلیل دقیق نیروهای وزن و نشت آب در پی پرداخته می شود. چنین برنامه هایی به دلایل زیر انجام می گیرد.

۱- عوامل ناشی از تخریب و شکست سد بسیار شدید است و موجب صدمات شدید جانی و مالی می گردد. علاوه بر این بسیاری از سدها زیر ساخت های جامعه محسوب می شوند.

۲- بارهای وارده به پی از طرف سد در مقایسه با سایر سازه ها بسیار بیشتر بوده و اغلب این بارها غیرعمودی می باشند. در مورد سدها مولفه برشی این نیروها می تواند باعث لغزش پی و نیروهای عمودی باعث تغییر شکل بیشتر از حد مجاز شود.

۳- نیروهای وارده به علت نوسانات سطح مخزن به شکل چرخه ای بوده و پی باید تحمل این تغییر تنش ها را بدون از دست دادن مقاومت خود داشته باشد.

۴- با توجه به اندازه بزرگ سازه سد و قرار گیری آن بر روی مواد با مقاومت و مدول تغییر شکل پذیری متفاوت، نشست ها و تغییر شکل های نامتقارن ممکن است ناپایداری را به همراه داشته باشد.

۵- با توجه به این که گرادیان هیدرولیکی بالا و فشار بالای آب در پی گسترش پیدا می کند، باید مطمئن شد که پی در مقابل این فشار ها مقاومت می کند [۹].

۲-۳- عوامل تهدید کننده پایداری پی در سد

در جریان آبگیری مخازن سد ها متناسب با حجم و ارتفاع آب، نیروهایی به بدنه پی و تکیه گاههای آن وارد می شود که ممکن است منشاء بروز پدیده هایی نظیر تغییر شکل های افقی و قائم(نشست) در قسمت های مختلف سد شود.

نفوذ آب مخزن در پی و تکیه گاههای سد ها باعث افزایش دبی زهکش ها و ازدیاد فشار آب برخاستی در زیر پی آن می شود. در سد های خاکی علاوه بر افزایش دبی زهکش ها منشاء افزایش فشار منفذی در بدنه آن می شود [۱۰].

به طور عمده می توان دلایل عمده شکست سد های خاکی را در ۶ مورد زیر خلاصه کرد

۱- سرریز شدن آب از روی تاج سد به دلیل ظرفیت ناکافی سرریز و سایر قسمت های تخلیه کننده.
۲- فرسایش درونی در محل تماس با پی سد و یا در در محل اتصال خاکریز ها یا سازه های مجاور و یا آبشستگی مواد موجود در خاکریز ها به دلیل غیر مکفی بودن لایه های فیلتر.
۳- ناهمگنی در پی که منجر به شکست پی یا فرسایش مصالح متشکله می شود.
۴- ایجاد ترک در بدنه ی سد ناشی از نشست های بزرگ در پی
۵- افزایش فشار آب منفذی در پی و کاهش تنش موثر
۶- روانگرایی مصالح پی سد در اثر بار دینامیک یا زلزله [۱۰]

در کلیه ی موارد به غیر از مورد ۱ می توان دید که ناپایداری بدنه سد از ناپایداری پی ناشی می شود و این موضوع اهمیت پی را در پایداری سد نشان می دهد.

با توجه به مطلب گفته شده می توان گفت از جمله مهمترین عوامل تهدید کننده پایداری پی های سد که منجر به ناپایداری سازه سد می گردد نشست بیش از حد مجاز و نامتقارن و همچنین فشار آب منفذی موجود در پی می باشد. در ادامه به بررسی این دو عامل مخرب پرداخته می شود.

۲-۳-۱- نشست نامتقارن

به طور کلی نشست در سد به تغییر شکل های عمودی ناشی از بارهای وزن بدنه سد و وزن آب مخزن می باشد. باید توجه داشت که شکل دره و مواد تشکیل دهنده ی پی نقش اساسی در رفتار سد دارد. در صورتی که دره محل احداث سد متقارن بوده و جنس آن در محدوده ی پی از تشکیلات مقاوم و یک دست باشد نشست نامتقارن بسیار ناچیز خواهد بود، در حالی که اگر دره یکپارچه نباشد و سازندهای تشکیل دهنده آن دارای مقاومت گوناگون و نفوذپذیری متغیر باشد طبیعی است که تغییر مکان های نامتقارن و مسائل مربوط به نشت آب از پی و تکیه گاهها قابل انتظار خواهد بود [۱۰].

در یک سد خاکی ترک خوردگی عرضی در اثر کشش مرتبط با نشست نامتقارن به وقوع می پیوندد. نشست های نامتقارن ممکن است در تکیه گاههای شیب دار یا در مجاورت سازه ها که متراکم کردن با مشکلات روبروست، بیشترین شدت را داشته باشند. خاکریز ریخته شده در مقابل پی های سنگی یا سطوح بتنی ناهموار باید شکل پذیری کافی داشته باشد تا بدون ترک خوردگی، با جابجایی ها سازگاری پیدا کند. معمولا در قسمت پایین تر بدنه، به سبب وجود فشردگی زیاد و مقطع نسبتا عریض، نشست های نامتقارن پی آمدهای جدی در بر ندارد. بر خلاف آن در قسمت های بالا ، وزن

جانبی زیادی جهت مقابله با ترک خوردگی کششی وجود ندارد و مسیرهای تراوش عرضی کوتاه می باشد. در این مناطق قرار دادن فیلتر محافظ می تواند ضروری باشد.

ترک خوردگی افقی در ناحیه ناتراوا امکان دارد بدلیل تمایل آن به نشست و قوس زدن در روی نواحی مجاور با قابلیت فشردگی کمتر، باشد. ترک خوردگی طولی می تواند ناشی از نشست پوسته های بالا دست در نتیجه ی اشباع اولیه توسط آب مخزن یا به علت پایین آوردن سطح آب باشد. همچنین ممکن است در اثر تحکیم نامتقارن در مصالح مجاور یا در اثر زمین لرزه صورت گیرد.

اگر چه هرگونه تمایل بدنه سد به ترک خوردن باید به طور دقیق ارزیابی شود لیکن بیشترین دقت باید به آن قسمت هایی از سد معطوف شود که مسیر های تراوش از میان ترک ها کوتاه و مستقیم هستند.

نواحی با پتانسیل کشش در یک سد خاکی را می توان به روش المان های محدود، با در نظر گرفتن شرایط مرزی و خصوصیات تنش-کرنش مصالح، تحلیل نمود. چنین تحلیل هایی نشان داده است که احتمال وقوع ترک خوردگی را می توان به طریق زیر کاهش داد.

۱- شکل دادن دقیق پی و محل های اتصال با سازه ها
۲- تراکم مناسب پوسته ی بالا دست به منظور کاهش نشست حاصل از اشباع
۳- انتخاب و اصلاح مصالح هسته در قسمت بالای سد به منظور اطمینان از بالا بودن نسبی پلاستیسیته
۴- ساخت مرحله ای به منظور کم کردن اثرات نشست پی و قسمت های پایین تر بدنه ی سد.

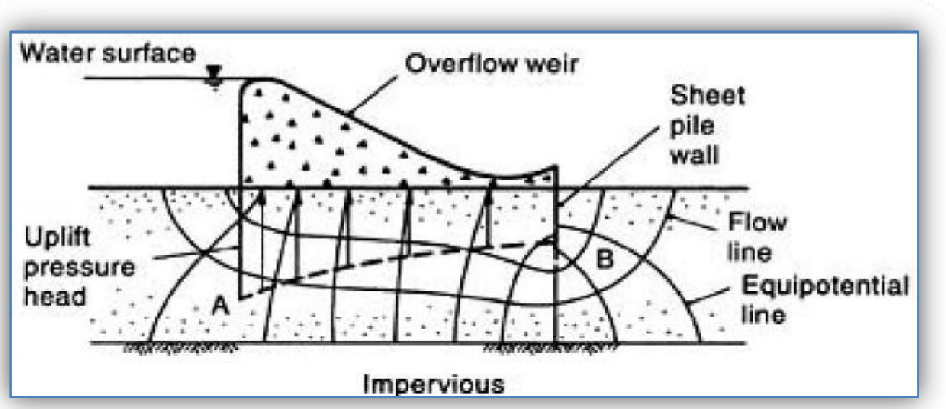
در جایی که نمی توان از جلوگیری از ترک مطمئن بود مانند موارد انقباض یا زمین لرزه، نواحی انتقالی یا فیلترهای عریض می توانند خطوط دفاعی با ارزشی باشند. باید به آسیب پذیری قسمت بالای سد خاکی در مقابل ترک خوردگی عرضی و به جدا شدگی آن در محل تماس با تکیه گاه، توجه دقیقی معطوف شود. از آنجایی که در این تراز مسیر های نشت کوتاه هستند، و فشار های داخلی بدنه سد ممکن است آنقدر پایین باشد که قادر به بستن ترک ها نباشند، لذا پیش بینی های خاصی مورد نیاز هستند. مخلوطی از شن ریز و ماسه خوب دانه بندی شده که به عنوان یک ناحیه در سمت بالا دست هسته قرار می گیرد، می توانند باز دارنده ی موثری برای ترک ها باشد [۱۱].

۲-۳-۲- فشار آب منفذی

اثر آب بر عملکرد پی را برای هر سازه ای از جمله سد باید در نظر گرفت. این اثرات شامل حرکت پی و بی ثباتی آن تحت تاثیر فشار آب برخاستی، هوازدگی و فرسایش سطوح ناپیوستگی ها در پی می باشد. به طور کلی از آنجایی که

نفوذپذیری سنگ بکر کم است، جریان آب بیشتر در بین ناپیوستگی ها برقرار می باشد. ناپیوستگی هایی که دارای بازشدگی کمتر باشند به علت نشت کم، فشار هیدرولیکی بیشتری را تولید می کنند [۹].

در پی سد لازم است هردو مورد فشار آب برخاستی و نشت کنترل شود. اقدامات کنترلی شامل اعمال پرده آب بند و عملیات زهکشی به منظور محدود کردن نشت و کاهش فشار آب منفذی می باشد. مشخصه سنگ که نشان دهنده ی مقدار نشت و کاهش هد آب می باشد، نفوذ پذیری است که با مقدار آب عبوری از آن و گرادیان هیدرولیکی آن مرتبط می باشد. همانطور که گفته شد جریان آب بیشتر در بین ناپیوستگی ها تمرکز دارد، در نتیجه مقدار نشت بیشتر به ساختار زمین شناسی منطقه مرتبط است. به عنوان مثال تلفات نشت در ساختاری که ناپیوستگی های آن به طور پیوسته دارای بازشدگی بالا باشد و یک مسیر عبور آب وجود داشته باشد بالا است. مطالعه مسیر های نشت و مقدار آن و محاسبه ی توزیع فشار آب در پی با استفاده از شبکه های جریان نشان داده می شود [۱۲]. شبکه جریان شامل دو مجموعه منحنی خطوط هم پتانسیل (خطوطی که نقاط دارای یک هد آب را به هم متصل می کند) و خطوط جریان (مسیر های عبور آب از طریق سنگ اشباع) که در شکل ۲-۱ نشان داده شده است، می باشد. از خطوط هم پتانسیل می توان جهت اندازه گیری فشار آب برخاستی در زیر پی استفاده نمود.



شکل ۲-۱- منحنی خطوط جریان و خطوط هم پتانسیل زیر پی سد [۵]

۲-۴- تحلیل پایداری پی های سنگی سد

در تحلیل پایداری پی[1] معمولا از مفهوم تنش، یعنی نیرو بر واحد سطح استفاده می شود، ولی این موضوع را همواره باید به خاطر داشت که پایداری کلی توسط نیروها کنترل می شود، زیرا تنش ها در سطوحی معنی پیدا می کنند

[1] Foundation