پردیس بین الملل

پایان نامه کارشناسی ارشد

بررسی موقعیت پرده های آب بند واقع بر پی سدهای بتنی با در نظر گرفتن مسئله تراوش

از
امیر مدندوست

استاد راهنما
دکتر میر احمد لشته نشایی

شهریور۱۳۹۰

بسم الله الرحمن الرحيم

پردیس بین الملل

گروه مهندسی عمران

گرایش خاک وپی

بررسی موقعیت پرده های آب بند واقع بر پی سدهای بتنی با در نظر گرفتن مسئله تراوش

از

امیر مدندوست

استاد راهنما

دکتر میر احمد لشته نشایی

استاد مشاور

دکتر رضا جمشیدی چناری

شهریور۱۳۹۰

تقدیم به

خانواده عزیزم

و

استاد ارجمند جناب آقای دکتر لشته نشایی

تشکر و قدردانی

با سپاس از درگاه پروردگار بخشنده و مهربان که همیشه لطف و رحمت او شامل حالم بوده و همواره گره های کارم را گشوده و یاریم نموده است و با تشکر فراوان از استاد بزرگوار جناب آقای دکتر لشته نشایی که با سعه صدر و دانش وسیع، راهنمایی و هدایتم نمودند. همچنین از جناب آقای دکتر جمشیدی چناری که با لطف خود به عنوان استاد مشاور اینجانب زحمات فراوانی را متقبل شدند بینهایت سپاسگذاری می نمایم. از طرفی از جناب آقای دکتر ویس کرمی و جناب آقای دکتر موسوی که زحمت داوری و بازنگری پایان نامه اینجانب را برعهده داشتند کمال تشکر را دارم.

چکیده

بررسی موقعیت پرده های آب بند واقع بر پی سدهای بتنی با در نظر گرفتن مسئله تراوش

امیر مدندوست

طراحی پی ابنیه هیدرولیکی در خاکهای نفوذپذیر همواره به عنوان یک مسئله عمده مورد توجه مهندسین و طراحان سازه های هیدرولیکی بوده است. مسئله تعیین زیرفشار و گرادیان هیدرولیکی در کلیه نقاط یک میدان نفوذپذیر و به خصوص در برخی از نقاط کلیدی آن، از مهمترین پارامترهای مؤثر در طراحی پی سدهای بتنی که بر روی این نوع مصالح قرار گرفته اند می باشد.

در این مطالعه با ارائه یک مدل عددی تأثیر موقعیت و طول پرده های آب بند بالادست، پائین دست و میانی و همچنین زهکش ها بر روی زیرفشار و گرادیان هیدرولیکی زیر سد بررسی شده است. نهایتاً با توجه به نتایج بدست آمده از مدل، پیشنهاداتی جهت طرح بهینه پی سدهای انحرافی به نحوی که با به حداقل رساندن هزینه بتن ریزی طرحی اقتصادی حاصل شود صورت گرفته است. نتایج بدست آمده از این مطالعه نشان می دهد که پرده آب بند میانی اثر چندانی در کاهش زیرفشار در سدهای بتنی نداشته است. درحالیکه ایجاد یک زهکش در مکانی مناسب می تواند تأثیر قابل توجهی در مشخصه های هیدرولیکی جریان به خصوص در تغییر چگونگی توزیع زیرفشار در سطح تماس سد با پی ایجاد نماید که در طراحی بهینه اینگونه سدها می تواند تأثیر گذار باشد.

همچنین در این مطالعه از روش بدون شبکه المان مرزی(BEM) که نسبت به روشهای دیگر عددی مانند روشهای وابسته به شبکه بندی از جمله روشهای تفاضلات متناهی(FDM)و المان محدود(FEM) که دارای سهولت و دقت بیشتری می باشد نیز استفاده شده است. نتایج حاصله با نتایج بدست آمده از نرم افزار رایج SEEP/Wکه بر مبنای روش المان محدود می باشد مقایسه شده و صحت و دقت نتایج بدست آمده مورد تائید قرار گرفته است.

کلید واژه: سد بتنی، پرده آب بند، زهکش، مشخصه های هیدرولیکی جریان، روش المان مرزی

فهرست مطالب

فهرست مطالب پ
فهرست جداول ج
فهرست اشکال چ
چکیده فارسی د
چکیده انگلیسی ذ
فصل اول: پیشگفتار ۱
۱-۱- مقدمه ۲
۱-۲- بیان مسئله و اهداف رساله ۲
۱-۳- ساختار پایان نامه ۴
فصل دوم: کلیات و مبانی تئوری ۵
۲-۱- مقدمه ۶
۲-۲- ضریب نفوذپذیری ۷
۲-۳- نظریه برنولی ۹
۲-۴- قانون دارسی ۱۰
۲-۵- نیروی نشت ۱۲
۲-۶- شیب آبی بحرانی ۱۳
۲-۷- معادله حاکم برای جریان حالت پایدار ۱۴
۲-۸- جریان در زیر سازه های حایل ۱۶
۲-۹- نظریه شبکه جریان ۱۶
۲-۱۰- شرایط مرزی ۱۸
۲-۱۱- سدهای انحرافی ۲۱
۲-۱۲- پرده های آب بند ۲۹
۲-۱۳- کاربرد پرده های آب بند ۳۰
۲-۱۴- انواع پرده های آب بند در سدها ۳۱
۲-۱۵- بتن پلاستیک و کاربردهای آن ۳۲
۲-۱۶- مقاومت فشاری بتن پلاستیک مورد استفاده در پرده های آب بند ۳۳
۲-۱۷- نفوذپذیری بتن پلاستیک مورد استفاده در پرده های آب بند ۳۳
۲-۱۸- زهکش های موضعی درکف پوش سدهای بتنی انحرافی ۳۶

فصل سوم: روشهای حل معادلات تراوش ۳۷
۳-۱- مقدمه ۳۸
۳-۲- روش آزمایشگاهی(مدل های فیزیکی) ۳۸
۳-۴- روش ترسیمی ۳۸
۳-۵- روشهای نظری- تجربی ۴۱
۳-۵-۱- روش بلای ۴۱
۳-۵-۲- روش لین ۴۳
۳-۵-۳- روش خوسلا ۴۴
۳-۵-۴- مطالعات قبلی ۴۴
۳-۶- روشهای عددی ۴۶
۳-۶-۱- روش تفاضلات متناهی(FDM) ۴۶
۳-۶-۲-روش المان محدود(FEM) ۴۹
۳-۶-۳-روش المان مرزی(BEM) ۵۰
۳-۶-۳-۱- مروری بر توسعه روش المان مرزی ۵۰
۳-۶-۳-۲- مزایای روش المان مرزی ۵۲
۳-۶-۳-۳- فرمول بندی روش المان مرزی ۵۲
۳-۶-۴-روش حل اساسی(MFS) ۵۷
۳-۶-۵- مروری بر مطالعات انجام شده در زمینه روشهای عددی ۵۹
فصل چهارم: مدل سازی عددی ۶۹
۴-۱- مقدمه ۷۰
۴-۲- اثر نفوذپذیری خاک ۷۲
۴-۳- اثر طول زهکش ۷۴
۴-۴- اثر طول پرده آب بند میانی ۷۶
۴-۵- اثر طول پرده آب بند بالادست بر زیرفشار ۷۸
۴-۶- اثر طول پرده آب بند پائین دست بر زیرفشار ۸۰
۴-۷- اثر توأم طول پرده های آب بند بالادست و پائین دست بر زیرفشار ۸۲
۴-۸- اثر طول پرده آب بند بالادست بر گرادیان هیدرولیکی ۸۴
۴-۹- اثر طول پرده آب بند پائین دست بر گرادیان هیدرولیکی ۸۶
۴-۱۰- اثر توأم طول پرده های آب بند بالادست و پائین دست بر گرادیان هیدرولیکی ۸۸
۴-۱۱- بررسی وقوع پدیده رگاب ۹۰

۴-۱۲- اثر زهکش بر کارایی پرده آب بند پائین دست ۹۲
۴-۱۳- اثر زهکش بر دبی تراوش از زیر سد ۹۴
فصل پنجم: مدل سازی به روش المان مرزی ۹۶
۵-۱- مقدمه ۹۷
فصل ششم: نتیجه گیری و پیشنهادات ۱۰۲
۶-۱- مقدمه ۱۰۳
۶-۲- نتیجه گیری ۱۰۳
۶-۳- پیشنهاد برای مطالعات آینده ۱۰۵
مراجع ۱۰۶

فهرست جداول

جدول۲-۱- مقادیر نمونه ضریب نفوذپذیری برای خاکهای مختلف ۷

جدول۳-۱- ضریب نفوذ بلای ۴۲

جدول۳-۲- ضریب نفوذ لین ۴۳

جدول۳-۳- مقایسه دو روش المان مرزی و تفاضلات متناهی و هر دو حالت از شکل دامنه ۶۵

جدول۳-۴- دبی تراوشی از زیر سد ۶۶

جدول۳-۵- مقایسه سطح آزاد بدست آمده از روش حل اساسی و روشهای عددی دیگر ۶۸

فهرست اشکال

شکل۲-۱- الف- جریان در امتداد افقی در خاکهای لایه بندی شده ۸
شکل۲-۱- ب- جریان در امتداد قائم در خاکهای لایه بندی شده ۸
شکل ۲-۲- بیضی نفوذپذیری ۹
شکل۲-۳- بار آبی کل برای جریان در داخل خاک ۱۰
شکل۲-۴- آزمایش دارسی ۱۱
شکل۲-۵- نیروی نشت ۱۲
شکل۲-۶- شیب آبی بحرانی ۱۴
شکل ۲-۷- مؤلفه های سرعت به داخل و خارج المان خاک ۱۴
شکل۲-۸- المان شبکه جریان ۱۷
شکل۲-۹- الف- مقطع یک سد خاکی، ب- مقطع یک سد بتنی ۲۰
شکل۲-۱۰- تنظیم سطح آب با سدهای انحرافی ۲۱
شکل۲-۱۱- سد انحرافی آسک ۲۲
شکل۲-۱۲- سد و نیروگاه تنظیمی انحرافی پای پل ۲۲
شکل۲-۱۳- سد تنظیمی دز ۲۳
شکل۲-۱۴- سد انحرافی رامشیر ۲۴
شکل۲-۱۵- سد انحرافی گنج افروز ۲۴
شکل۲-۱۶- نمای از بالای سد انحرافی گنج افروز ۲۵
شکل ۲-۱۷- احداث شبکه زهکشی جهت خروج آب زیرزمینی ۲۵
شکل۲-۱۸- الف- ایجاد زهکش های زیرزمینی، ب- مقطع زهکش زیرزمینی ۲۶
شکل۲-۱۹- کندن گود به وسیله بیل مکانیکی ۲۷
شکل۲-۲۰- عملیات حفاری ۲۷
شکل۲-۲۱- قرار گرفتن سبد آرامتور آماده شده توسط چرثقیل در محل حفاری ۲۸
شکل۲-۲۲- دستگاه آزمایش تعیین نفوذپذیری بتن پلاستیک ۳۴
شکل۳-۱- جریان عبوری از الف- المان واقعی و ب- المان تبدیل یافته ۴۰
شکل ۳-۲- مسیر تراوش بر اساس نظریه بلای ۴۱
شکل ۳-۳- دیاگرام خوسلا مربوط به زیرفشار و گرادیان هیدرولیکی ۴۵
شکل۳-۵- قسمتی از شبکه مربوط به میدان جریان ۴۷

شکل۳-۶- شبکه بندی پی سد بتنی در روش تفاضلات متناهی ۴۸
شکل ۳-۷- نمونه تقسیم یک محیط دوبعدی به المانهای محدود مثلثی ۴۹
شکل۳-۸- تعداد مقالات ژورنال منتشرشده در روش المان مرزی ۵۱
شکل۳-۹- نمایش مرز میدان متخلخل در روش المان مرزی ۵۳
شکل ۳-۱۰- نمایش نقاط مرزی در روش المان مرزی ۵۵
شکل ۳-۱۱- انواع مختلف المان های مرزی ۵۶
شکل۳-۱۲- توزیع نقاط مرزی (دوایر سفید)و نقاط مرجع(مربع های سفید) ۵۸
شکل۳-۱۳- مقایسه سطح آزاد در مدل و Mseep همچنین خطوط هم پتانسیل ۵۹
شکل۳-۱۴-مقایسه سطح آزاد در مدل و حل دوپویی ۵۹
شکل۳-۱۵- سدی مستطیلی خاکی بر روی پی دو لایه ای ۶۰
شکل۳-۱۶- دامنه با دو ناحیه با ضریب هدایت هیدرولیکی مختلف ۶۱
شکل۳- ۱۷- مقایسه نتایج مدل با نرم افزارMseep ۶۱
شکل۳-۱۸- سدی مستطیلی بر روی پی شامل سپری ۶۲
شکل۳-۱۹- سپری و المان های آن ۶۲
شکل۳-۲۰- مقایسه نتایج مدل المان مرزی با نرم افزار Mseep ۶۳
شکل۳-۲۱- ابعاد سازه و عمق خاک مورد مطالعه ۶۳
شکل۳-۲۲- نحوه مش بندی در روش تفاضلات متناهی(حالت۱) ۶۴
شکل۳-۲۳- نحوه مش بندی در روش المان مرزی(حالت۱) ۶۴
شکل۳-۲۴- نحوه مش بندی در روش المان مرزی(حالت۲) ۶۴
شکل۳-۲۵- الف: توزیع پتانسیل به روش تفاضلات متناهی ۶۵
شکل۳-۲۶- جریان درون یک سد مستطیلی ۶۶
شکل۳-۲۷- فلوچارت فرایند تکرار ۶۷
شکل۳-۲۸- مقایسه نتایج روش حل اساسی و روش تحلیلی ۶۷
شکل۴-۱- متغیرهای موجود در مدل سد بتنی ۷۰
شکل۴-۲-الف- اثر نفوذپذیری بر زیرفشار ۷۳
شکل۴-۲- ب- اثر نفوذپذیری برگرادیان هیدرولیکی ۷۳
شکل۴-۳- الف- اثر طول زهکش بر زیرفشار ۷۵
شکل۴-۳- ب- اثر طول زهکش بر گرادیان هیدرولیکی ۷۵
شکل۴-۴- الف- اثر طول پرده آب بند میانی بر زیرفشار ۷۷

شکل۴-۴- ب- اثر طول پرده آب بند میانی بر گرادیان هیدرولیکی ۷۷
شکل۴-۵-اثر طول پرده آب بند بالادست بر زیرفشار ۷۹
شکل۴-۶-اثر طول پرده آب بند پائین دست بر زیرفشار ۸۱
شکل۴-۷-اثرتوأم طول پرده های آب بند بالادست و پائین دست بر زیرفشار ۸۳
شکل۴-۸-اثر طول پرده آب بند بالادست بر گرادیان هیدرولیکی ۸۵
شکل۴-۹-اثر طول پرده آب بند پائین دست بر گرادیان هیدرولیکی ۸۷
شکل۴-۱۰-اثر توأم طول پرده های آب بند بالادست و پائین دست بر گرادیان هیدرولیکی ۸۹
شکل۴-۱۱- بررسی وقوع پدیده رگاب در سد بتنی انحرافی بدون آب بند و زهکش ۹۱
شکل۴-۱۲- بررسی وقوع پدیده رگاب در سد بتنی انحرافی دارای زهکش ۹۱
شکل۴-۱۳- اثر زهکش بر کارایی پرده آب بند پائین دست در حالت (D_1/D_2=%۴۰) ۹۳
شکل۴-۱۴- اثر زهکش بر کارایی پرده آب بند پائین دست در حالت (D_1/D_2=٪۸۰) ۹۳
شکل۴-۱۵- اثر زهکش بر دبی تراوش از زیر سد ۹۵
شکل۵-۱ – متغیرهای موجود در مدل پی سد بتنی ۹۸
شکل۵-۲- شبکه بندی شماتیک مدل ریاضی پی سد بتنی ۹۹
شکل۵-۳- اثر زهکش بر کارایی پرده آب بند پائین دست در حالت (D_1/D_2=٪۴۰) با استفاده از دو روش المان محدود و المان مرزی ۱۰۰
شکل۵-۴- اثر زهکش بر کارایی پرده آب بند پائین دست در حالت (D_1/D_2=٪۸۰) با استفاده از دو روش المان محدود و المان مرزی ۱۰۰
شکل۵-۵- اثر زهکش بر دبی تراوش از زیر سد با استفاده از دو روش المان محدود و المان مرزی ۱۰۱

فصل اول

پیشگفتار

۱-۱- مقدمه

ایجاد سازه های آبی در مناطقی که نفوذ آب از زیر تأسیسات محتمل باشد، بـدلیل ناپایـداریهای ناشـی از نـشت آب مستلزم دقت فراوان است. ناپایداریهای یادشده عمدتاً به دو علت یکی توسعه زیرفشار[1] و تغییـر در تعـادل نیروهـای مؤثر بر سازه و دیگری فرسایش تدریجی درونی مصالح پی و وقوع پدیده رگاب[2] رخ می دهد. لذا در تمام مواردی کـه پی یک سازه روی بستر قابل نفوذ قرار داشته باشد، ضروری است که فشار وارده به سطح تماس سازه و نیز گرادیـان هیدرولیکی خروجی[3] در پائین دست سطح تماس فوق الذکر برآورد و محاسبه گردد. بـرای نمونـه مطالعـاتی از ایـن قبیل در مورد احداث سد انحرافی روی بستر آبرفتی رودخانه از ضروریات است زیرا در اثر ذخیره آب در بالادسـت و در نتیجه ایجاد اختلاف ارتفاع سطح آب در بالادست و پائین دست، نفوذ از زیر پـی ممکـن شـده و ایـن امـر باعـث اعمال فشار به سطح تماس سد با پی می گردد.

۱-۲- بیان مسئله و اهداف رساله

از مهمترین روشهای کنترل تراوش در پی سدها احداث پرده های آب بند و نیز تعبیه زهکـش مـی باشـد. طراحـان مختلف، پرده های آب بند را به روشهای گوناگون در بالادست، پائین دست و میانه سـد قـرار مـی دهنـد و طولهـای مختلفی برای آنها در نظر می گیرند. این طرحها گاهی همراه با زهکش نیز می باشند. حـال سـوالی کـه مطـرح مـی شود این است که کدام طرح بهینه است. منظور از طرح بهینه طرحی است کـه در آن هـم معیارهـای طراحـی کـه مهمترین آنها پایداری سازه است رعایت گردد و هم از نظر اقتصادی مقرون به صـرفه باشـد. در ایـن مطالعـه بیـشتر روی دو روش مهم و پراستفاده یعنی احداث پرده آب بند و زهکش تأکید شده است و سعی شده تا بـین انـواع پـرده آب بند و نیز تعداد آنها و نیز محل احداث و تعبیه زهکش بهینه یابی گردد. روش کار در این مطالعه به ایـن صـورت است که تأثیر پارامترهای مختلفی نظیر نفوذپذیری خاک، طول پرده های آب بند، محل استقرار آنها و محـل تعبیـه زهکش بر زیرفشار و گرادیان هیدرولیکی خروجی مورد بررسی قرار گرفته و نتایج به صورت نمودارهایی ترسیم شده است و سپس این نمودارها مقایسه و تفسیر شده و نتیجه گیری در خصوص موقعیـت مکـانی پـرده هـای آب بنـد و زهکش حاصل شده است.

---

[1] Uplift Pressure
[2] Piping
[3] Exit Hydraulic Gradient

امروزه با بهره گیری از امکانات کامپیوتری و کاربرد وسیع روشهای عددی، براحتی می توان با دقت قابل قبول به نتایج حاصل از روشهای ترسیمی یا محاسباتی دست یافت. روشهای عددی که امروزه بطور وسیع در این زمینه کاربرد دارند عبارتند از روش تفاضلات متناهی، روش المان محدود و روش المان مرزی.

کلیه روشهای فوق جهت حل معادلات حرکت آب در خاک در یک میدان نفوذپذیر و متخلخل بکارگرفته شده و به طریق عددی با دقت قابل قبول مقادیر زیرفشار و گرادیان هیدرولیکی در هر نقطه از میدان نفوذپذیر پی یک سد بتنی را بدست می دهد.

از محاسن عمده این روشها می توان از سرعت بخشیدن به محاسبات و تفسیر نتایج آن به کمک کامپیوتر نام برد. به کمک این روشها براحتی می توان اثرات متغیرهای مهم دخیل در پدیده زیرفشار را بررسی نمود و پی مناسب متناسب با شرایط محلی مصالح واقع در زیر سازه برای اینگونه سازه ها طراحی کرد.

یکی از جدیدترین روشهای عددی در این زمینه روش المان مرزی است که اخیراً جهت حل معادله لاپلاس در محیط متخلخل بطور وسیعی بکارگرفته شده و سرعت و دقت نتایج آن، این روش را بصورت یکی از کاربردی ترین روشهای مورد استفاده در مهندسی- طراحی معرفی کرده است، در این مطالعه نیز مورد ارزیابی و بررسی قرار گرفته است و جهت صحت سنجی نتایج با نتایج یکی از نرم افزارهای معتبر در زمینه تراوش که با استفاده از روش المان محدود عمل می کند مقایسه شده است. از مزایای عمده این روش، سرعت کار در تعیین مقادیر پتانسیل و گرادیان هیدرولیکی در کلیه نقاط میدان نفوذپذیر پی یک سد بتنی می باشد که نهایتاً می توان براحتی تغییرات زیرفشار و گرادیان هیدرولیکی را در اثر عوامل مختلف دخیل در پدیده حرکت آب در خاک مورد بررسی قرار داد.

۱-۳- ساختار پایان نامه

این رساله شامل ۶ فصل می باشد. فصل اول شامل سه بخش مقدمه، بیان مسئله و ساختار پایان نامه است که در قسمت مقدمه دلایل لزوم تحقیق ارائه گردیده و در قسمت بیان مسئله، بیان مسئله و اشاره به روشهای مختلف انجام مسئله با توجه به اهداف رساله تشریح شده است. و در قسمت ساختار پایان نامه به مطالب فصول مختلف این پایان نامه اشاره گردیده است.

در فصل دوم، اصول و مبانی تئوریک حرکت آب در خاک بمنظور حل معادلات تراوش در محیط های متخلخل، تشریح شده است.

فصل سوم اختصاص به روشهای کلی محاسبه زیرفشار و بطورکلی حل معادله لاپلاس در محیط های متخلخل دارد. در این فصل پس از معرفی روشهای موجود، روشهای عددی بررسی خواهند شد.

در فصل چهارم، ساختار پروژه و نمودارهای بدست آمده ارائه شده و روی اثر پارامترهای مختلف بحث و نتایج بدست آمده ذکر شده است.

در فصل پنجم، مدل المان مرزی برای مسئله مورد مطالعه ارائه و نتایج حاصله با روش المان محدود مقایسه گردیده است.

نهایتاً در فصل ششم، جمع بندی نهایی، نتیجه گیری و راهکارهایی نیز برای ادامه تحقیقات مربوط در این زمینه پیشنهاد شده است.

فصل دوم

کلیات و مبانی تئوری

۲-۱- مقدمه

وجود فشار آب حفره ای در توده خاک لزوماً ناشی از شرایط هیدرواستاتیکی نمی باشد. اگرچه ممکن است شرایط هیدرواستاتیکی، موجب بوجود آمدن جریان های آب زیرزمینی در حفرات خاک گردد. به عنوان مثال در مورد سدی که بر روی یک لایه رسوبی از خاک بنا شده و آب در ارتفاع مشخصی در بالادست قرار دارد، به علت وجود اختلاف ارتفاع بین دو طرف سد در خاک زیر پی شاهد تراوش از طرف بالادست به سمت پائین دست سد خواهیم بود. با گسترش تراوش، فشار آب حفره ای در داخل توده خاک از مقدار اولیه خود تا مقادیر نهایی که سازگار با شرایط مرزی جدید است، رسیده و در چنین شرایطی، تغییر حجم در توده خاک رخ خواهد داد. در فاصله زمانی تا رسیدن به سازگاری با شرایط مرزی جدید، جریان تراوش تابعی از زمان بوده که به آن جریان گذرا[1] اطلاق می شود. هنگامی که فشار آب حفره ای در تمامی نقاط، با شرایط مرزی جدید به تعادل رسید، جریان تراوش مستقل از زمان گردیده که به آن حالت پایدار[2] گفته می شود.

سرعت رسیدن فشار آب حفره ای به مقادیر تعادلی جدید، اساساً به نوع خاک بستگی دارد. ماسه ها با شرایط زهکشی آزاد و شن ها آمادگی بهتری برای ایجاد جریان آب در خود داشته و فشار آب حفره ای به سرعت به میزان تعادلی خود می رسد. بنابراین به دنبال هرگونه تغییر در شرایط مرزی هیدرولیکی ، می توان فرض نمود که ماسه ها وشن ها بطور آنی به شرایط پایدار خواهند رسید. در مقابل، شرایط حالت پایدار در خاک های رسی با شرایط زهکشی کننده، طی سالیان دراز قابل حصول می باشد.

بر اساس آزمایشهای کلاسیک Reynolds در اواخر ۱۸۰۰ میلادی می توان جریان آب در خاک را به دو حالت جریان لایه ای[3] و جریان آشفته[4] تقسیم کرد.

جریان لایه ای جریان منظمی است که در لایه های خاک، هر ذره از آب در مسیر مشخصی حرکت می کند و هرگز مسیر این ذرات مسیر ذرات دیگر را قطع نمی کنند. در یک بازه از جریان لایه ای، گرادیان هیدرولیکی متناسب با سرعت جریان است. جریان لایه ای در سرعت های کم رخ می دهد. ولی در سرعت های بیشتر، آشفتگی و بی نظمی در الگوهای جریان مشاهده می شود که در آن مسیر های جریان تصادفاً همدیگر را قطع می کنند، به این نوع جریان جریان آشفته گویند. در این حالت گرادیان هیدرولیکی با مجذور سرعت تغییر می کند. اما حفرات خاک

---

[1] Transient Flow
[2] Steady State Flow
[3] Laminar Flow
[4] Turbulent Flow

معمولا کوچک بوده و سرعت تراوش کم است. بنابراین در اکثر موارد، جریان آب زیرزمینی، جریان لایه ای خواهد بود[۱].

۲-۲- ضریب نفوذپذیری

ضریب نفوذپذیری (k) یا ضریب هدایت هیدرولیکی[1] که دارای واحد سرعت جریان است برای خاکهای مختلف به مقدار زیادی تفاوت می کند. جدول (۲-۱) حدود این تغییرات را نشان می دهد.

جدول۲-۱- مقادیر نمونه ضریب نفوذپذیری برای خاکهای مختلف[۲]

نوع خاک	ضریب نفوذپذیری بر حسب mm/s
شن درشت	۱۰ تا $۱۰^{۳}$
شن ریز، ماسه درشت و متوسط	$۱۰^{-۲}$ تا ۱۰
ماسه ریز، لای سست	$۱۰^{-۴}$ تا $۱۰^{-۲}$
لای متراکم، لای رس دار	$۱۰^{-۵}$ تا $۱۰^{-۴}$
رس لای دار، رس	$۱۰^{-۸}$ تا $۱۰^{-۵}$

ضریب نفوذپذیری خاکها که معرف خصوصیات فیزیکی خاک از نقطه نظر تراوش است به عوامل متعددی بستگی دارد. این عوامل عبارتند از تخلخل، درجه اشباع و دانه بندی خاک و همچنین لزجت سیال.

با توجه به مشخصات فیزیکی محیط روابط تجربی فراوانی برای بیان ضریب نفوذپذیری ارائه شده است. به عنوان نمونه رابطه معروف هازن برای ماسه ها با دانه بندی یکنواخت که بصورت زیر بیان می گردد:

$$k = 100(D_{10})^2 \qquad (۱-۲)$$

البته روشهای آزمایشگاهی استانداردی نیز برای این منظور ابداع شده است که نتایج قابل اطمینان تری بدست می دهد.

در خاکهای غیرهمگن و لایه بندی شده مطابق شکل(۲-۱) که ضریب نفوذپذیری جریان لایه ها مختلف است ضریب نفوذپذیری معادل به صورت زیر بدست می آید[۳]:

الف) جریان افقی در خاکهای لایه بندی شده(شکل۲-۱- الف)

$$k_{e(h)} = \frac{1}{H}(k_{h1}H_1 + k_{h2}H_2 + k_{h3}H_3 + \cdots) \qquad (۲-۲)$$

[1] Hydraulic Conductivity