بسم الله الرحمن الرحيم

تقدیم به:

همسر و فرزندانم

تراوش در خاک اشباع و غیر اشباع

دکتر حسن قاسم زاده

عضو هیات علمی دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

اردیبهشت ماه ۱۳۸۹

سرشناسه	: قاسمزاده ، حسن
عنوان و نام پدیدآور	: تراوش در خاک اشباع و غیراشباع/ حسن قاسمزاده.
مشخصات نشر	: تهران: دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، ۱۳۸۹.
مشخصات ظاهری	: ۳۲۸ ص.: مصور، جدول، نمودار .
فروست	: انتشارات دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی؛ ۲۶۱.
شابک	: ۵۰۰۰۰ ریال: 978-964-8703-75-7
وضعیت فهرست نویسی	: فیپا
یادداشت	: واژهنامه .
یادداشت	: کتابنامه .
موضوع	: خاک -- نفوذپذیری -- اندازهگیری
موضوع	: خاک -- نفوذپذیری -- شبیهسازی کامپیوتری
شناسه افزوده	: دانشگاه صنعتی خواجه نصیر الدین طوسی
رده بندی کنگره	: ۱۳۸۹TA۷۱۰ ۴ت۱۷ق/
رده بندی دیویی	: ۶۲۴/۱۵۱۳۶
شماره کتابشناسی ملی	: ۸۵۲۰۲

نام کتاب: **تراوش در خاک اشباع و غیراشباع**

مولف: دکتر حسن قاسمزاده ، عضو هیئت علمی دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

ناشر : انتشارات دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

نوبت چاپ : اول

تاریخ چاپ : اردیبهشت ۱۳۸۹

تیراژ : ۲۰۰۰ جلد

قیمت : **۵۰۰۰ تومان**

کد کتاب : ۲۶۱

شابک : ۷-۷۵-۸۷۰۳-۹۶۴- ۹۷۸ ISBN: 978- 964-8703-75-7

لیتوگرافی:

چاپ و صحافی :

(حق چاپ برای ناشر محفوظ است)

مقدمه

تأثیرات دو جانبه پیشرفت رایانه‌ها و علوم مهندسی سبب گردیده است که در حل مسایل مهندسی، رایانه نقشی بی بدیل ایفا نماید. اغلب برای حل مسایل پیچیده مهندسی با به‌کار گیری تئوری‌های موجود، معادلات حاکم بر محیط مربوطه نوشته می‌شود سپس با استفاده از روش‌های تحلیلی یا روش‌های عددی معادلات حل می‌شود. از آن‌جا که اکثر مسایل مهندسی دارای شرایط مرزی نسبتاً پیچیده می‌باشند استفاده از روش‌های عددی جهت حل معادلات دیفرانسیل حاکم بر محیط بسیار معمول است.

جهت حل مسایل در مهندسی عمران نرم‌افزار های عددی نسبتاً زیادی در دسترس می‌باشد بعضی از این نرم‌افزار ها کاربرد وسیعی داشته و لزوم آشنایی مهندسین با آن‌ها احساس می‌گردد. از آن‌جا که استفاده از نرم‌افزار ها بدون دانستن تئوری‌های مربوطه منجر به حل نا صحیح مسایل می‌گردد نیاز به دانستن تئوری وجود دارد. همچنین در زمینه مدل‌سازی این مسایل نیاز به رعایت نکات ظریفی می‌باشد تا مدل ارایه شده بیش‌ترین مشابهت را به شرایط واقعی مساله داشته باشد. در سری کتاب‌های معرفی نرم‌افزارهای عددی مهندسی عمران ســعی بر آن است که برای حل مسایل مختلف مهندسی عمران ابتدا تئوری‌های مربوطه بیان شده و سپس بهترین نرم‌افزار های مرتبط به همراه نکات لازم در مدل‌سازی به علاقه مندان معرفی گردد.

کتابی که در پیش رو دارید به شرح مساله تراوش آب در خاک می‌پردازد. معادله دیفرانسیل نشت آب در خاک اشباع یا معادله لاپلاس قبل از عصر رایانه‌ها توسط روش ترسیمی یعنی رسم خطوط جریان و خطوط هم پتانسیل حـــل می‌گردید. امروزه این روش قدیمی با روش‌های عددی جایگزین شده است. خصوصاً مشخص گردیده است که مسایل نشت آب وابستگی نسبتاً زیادی به شرایط خاک از جمله غیراشباع بودن خاک دارد .غیر خطی بودن معادلات نشت آب در حالت غیراشباع و همچنین پیچیده بودن شرایط مرزی ما را ناگزیر به استفاده از روش‌های عددی می‌نماید. یکی از مجموعه نرم‌افزارهای قدرتمند در زمینه محاسبه تراوش آب در خاک‌های اشباع و غیراشباع نرم‌افزار GeoStudio می‌باشد که مدل‌سازی مسایل نشت آب در خاک توسط این نرم‌افزار عددی خصوصا زیر برنامه‌های SEEP/W و VADOSE/W در این کتاب بیان خواهد گردید.

امید که این کتاب راهنمای مناسبی جهت علاقه‌مندان رشته مهندسی عمران و سایر تخصص‌های مرتبط چه در سطح دانشجویی و چه در سطح شرکت‌های مهندسین مشاور باشد. مولف به این نکته واقف است که کتاب ممکن است دارای کاستی‌ها و اشکالاتی باشد. ذکر این موارد و ارسال آن‌ها از طریق پست الکترونیکی Ghasemzadeh@kntu.ac.ir باعث مباهات و افتخار خواهد بود.

در خاتمه از تمامی دانشجویانی که در تهیه این کتاب مرا یاری نمودند به خصوص دانشجویان کارشناسی ارشد گرایش خاک و پی دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی ورودی سال ۱۳۸۶ تشکر می‌نمایم. همچنین از آقایان مهندس محمد حسین جهانگیر و یاشار زرین‌قلم و خانم مهندس عصمت اکبری جلال‌آباد که در آماده سازی کتاب مرا یاری نمودند صمیمانه سپاس‌گزاری می‌نمایم. از خانم هدا کبیری‌زادگان نیز که در تایپ این متن زحمات زیادی را تقبل نمودند تشکر نموده و توفیق روز افزون ایشان را از خداوند منان خواستارم.

دکتر حسن قاسم زاده
دانشکده عمران دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
اردیبهشت ماه ۱۳۸۸ – تهران

محتوای کتاب

بررسی جریان آب عبوری از خاک یکی از مسایل بنـیادی در مکانیـک خاک و مهندسی محیط زیست می‌باشد. بدیهی است که اگر آبی در خاک وجود نداشته باشد، هیچ اکو سیستمی و هیچ انسانی بر روی زمین نخواهد بود و لزوماً دیگر احتیاجی به مهندسی مکانیک خاک و محیط زیست نیست.

مقدار جریان، اغلب به عنوان پارامتر کلیدی در تعیین افت‌های دبی خروجی از یک مخزن و مقدار آب قابل مصرف خانگی و مصارف صنعتی در نظر گرفته می‌شود. در بررسی جریان آب در خاک، مهـم ترین مسأله، فشار آب حفره‌ای است. فشار آب حفره‌ای چه مثبت و چه منفی یک نسبت مستقیم با مقاومت برشی و خصوصیات تغییر شکل خاک دارد. در چند دهه گذشته تحقیقات نشان می‌دهد که حتی جریان مرطوب در خاک غیراشباع نزدیک سطح زمین با مکش خاک (فشار منفی آب) رابطه‌ای مستقیم دارد. بنابراین حتی اگر مقدار جریان هدف اصلی باشد، مهم آن است که فشارهای آب حفره‌ای به طور دقیق شناسایی شود.

در گذشته، تحلیل‌های مرتبط با جریان آب زیرزمینی بر روی جریان در خاک اشباع متمرکز بود. این مسایل به دو صورت معمولاً وجود داشتند. در حالت اول سفره آب زیرزمینی محصور بوده و تحت فشار قرار می‌گیرد در حالت دوم سفره آزاد بوده و تحت فشار قرار ندارد. مسایل نامحصور جریان بسیار دشوارتر تحلیل می‌شوند زیرا تحلیل آن احتیاج به تعیین سطح آزاد آب دارد. از این رو سطح آزاد آب به صورت یک مرز فوقانی در نظر گرفته شده و از جریان‌هایی که ممکن است در ناحیه مویینگی (بالای خط آزاد آب) بوجود بیاید، صرف نظر می‌شود.

این ساده سازی و صرف نظر کردن از جریان غیراشباع بالای سطح آزاد آب قابل قبـول نیست. انجام این کار نه فقط چشـم پوشی از یک جزء با اهمیت، از جریان آب در خاک است بلکه مهم‌تر این است که انواع مسایلی که می‌تواند مورد تحلیل قرار گیرد، محدود می‌شود. جریان غیراشباع در وضعیت‌های متنوع مانند تراوش ناشی از بارندگی باید بررسی شود. موارد جریان‌های زودگذر نیز مثال خوبی از این دست می‌باشند. تقریباً این امکان وجود ندارد که تراوش آب باران در زمین را بدون در نظر گرفتن شرایط خاک غیراشباع مدل نمود. بنابـراین، نمی‌توان از ناحـیه غیراشباع صرف نظر کرد. تئوری‌های مربوط به تراوش آب در خاک غیراشباع در این کتاب بیان شده و با کمک نرم‌افزار انتخاب شده می‌توان جریان غیراشباع را در مدل‌سازی عددی مورد بررسی قرار داد. به‌این ترتیب دروازه جدیدی بر روی تحلیل اغلب مسایل تراوش باز می‌شود.

اصطلاح "*تراوش*" معمولاً به وضعیت‌هایی که نیروی رانش اولیه توسط گرانش زمین کنترل می‌شود، اطلاق می‌گردد؛ نظیر تراوش و افت‌های مربوطه از یک مخزن که نیروی رانش مجموع اختلاف هِد هیدرولیکی بین نقاط ورودی و خروجی است. یعنی حرکت آب صرفاً ناشی از نیروی گرانشی می‌باشد.

نوع دیگری از جریان آب وجود دارد که با افزایش فشار آب منفذی به وجود می‌آید مثلاً بارگذاری خارجی بر روی زمین که باعث افزایش فشار آب منفذی در خاک شده و جریان آب را به همراه دارد. گرچه به این نوع از جریان آب ممکن است تراوش اطلاق نشود ولی روابط اساسی ریاضی مطرح شده برای هر دو مورد از جریان آب، اساساً یکسان هستند. در نتیجه، فرمول‌بندی یک نرم‌افزار تحلیل مسایل تراوش می‌تواند جهت استهلاک اضافه فشارهای آب منفذی ناشی از تغییرات تنش در خاک استفاده شود. در این کتاب اصطلاح "تراوش" برای تشریح کلیه حرکت‌های آب در خاک صرف نظر از نیروی مسبب حرکت اطلاق می‌شود. همچنین عنوان تراوش برای حرکت آب در خاک‌های اشباع و غیراشباع استفاده می‌شود.

مدل کردن جریان آب در خاک با استفاده از روش‌های عددی می‌تواند بسیار پیچیده شود. خاک طبیعی به طور کلی ناهمگن و ناهمسان می‌باشد. اغلب، شرایط مرزی با زمان تغییر می‌کنند و همواره در ابتدای یک تحلیل نمی‌توانند با اطمینان تعریف شوند. در اصل، تعیین شرایط مرزی درست بعضی اوقات می‌توانند جزئی از حل مسأله باشند. همچنین، وقتی یک خاک در شرایط غیراشباع باشد، ضریب نفوذپذیری یا ضریب هدایت هیدرولیکی، تابعی از فشار آب حفره‌ای منفی در خاک می‌شود. فشار آب اولین مجهول است که لازم است تعیین شود و نیاز است از تکنیک‌های عددی برای محاسبه فشار آب حفره‌ای و خواص مصالح ، که قویاً روش حل را غیر خطی می‌سازد استفاده شود. این پیچیدگی‌ها استفاده از روش‌های عددی را برای آنالیز مسایل تراوش در همه موارد به‌جز مسایل ساده، لازم می‌سازد. یک رویکرد معمول استفاده از روابط اجزای محدود می‌باشد.

در حالیکه بخشی از این کتاب تئوری‌های مساله تراوش را بیان می‌کند، بخشی دیگری از کتاب در مورد تکنیک‌های کلی مدل‌سازی عددی است. مدل‌سازی عددی یک نوع مهارت است که فراگیری آن لازم می‌باشد. داشتن یک نرم‌افزار ما را به یک مدل‌ساز ماهر تبدیل نمی‌کند. مدل‌سازی عددی درست نیاز به تفکر دقیق و برنامه‌ریزی دارد و همچنین یک درک خوب از مفاهیم بنیادی فیزیک را لازم دارد. برای بسیاری از مسایل جنبه‌هایی از قبیلِ ایجاد یک شبکه المان‌های محدود و ارضاء شرایط مرزی در ابتدا کاملاً مشخص نیستند. لذا سعی و خطا و تفکر برای آسان شدن مدل‌سازی‌های عددی این گونه مسایل لازم است. یک بخش عمده از این کتاب بر روی راه کارهای کلی انجام مدل‌سازی عددی درست متمرکز شده است.

در صورتی‌که تنها این کتاب را برای استفاده اولیه از نرم‌افزار SEEP/W جهت حل یک مساله ساده تراوش تهیه کرده‌اید کافی‌است *پیوست الف* با عنوان شروع ساده را مطالعه نمایید. برای داشتن یک درک صحیح درحل مسایل، *فصل اول* کتاب تئوری تراوش در خاک اشباع و غیر اشباع و پارامترهای مربوطه را شرح می‌دهد. *فصل دوم* با عنوان مدل‌سازی عددی منحصراً به بحث در مورد چگونگی مدل‌سازی عددی

اختصاص داده شده است. همچنین به اصول کلی مدل‌سازی عددی اشاره شده و در بحث تراوش مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

در حالت کلی، سه قسمت عمده برای مدل‌سازی به روش المان محدود وجود دارد. اولین قسمت ایجاد شبکه بندی است که به معنای تقسیم بندی محیط به نواحی کوچکی به نام المان می‌باشد. دومین بخش تعیین کردن و اختصاص دادن مصالح به المان هاست. سومین قسمت، تعیین و ارضاء کردن شرایط مرزی محیط می‌باشد. فصل‌های مجزایی برای هر کدام از این سه مفهوم کلیدی در این کتاب اختصاص داده شده است.

مدل‌سازی عددی تراوش به صورت اشباع و غیراشباع یک مسأله قویاً غیر خطی است که برای حل به تکنیک‌های تکرار شونده احتیاج دارد. متعاقباً هم‌گرایی عددی نیز یک مسأله کلیدی است. همچنین انتگرال‌گیری زمانی که برای آنالیز حالت گذرا به اندازه گام‌های زمانی نسبت به اندازه المان‌ها و همچنین به ویژگی مصالح وابسته می‌باشد. این گونه ملاحظات عددی در *فصل هشتم* با عنوان مسایل عددی مورد بحث قرار گرفته‌اند.

فصل یازدهم ، با عنوان نکات و ترفندهای مدل‌سازی جهت راهنمایی بیش‌تر آورده شده است این فصل شامل تکنیک‌های ساده بوده که می‌تواند برای بهبود مدل‌سازی مورد استفاده قرار گیرد. این فصل به درک بهتر مفاهیم روش المان محدود و نتایج حاصله از نرم افزارکمک نموده و تسلط شما به نرم‌افزار را افزایش می‌دهد.

فصل دوازدهم حاوی یک‌سری مثال می‌باشد؛ برخی از مثالها به وسیله دانلود از سایت Geo-Slope در دسترس می‌باشد. توصیه می‌شود این فصل را با دقت مطالعه نموده و مثال‌ها را با استفاده از نرم‌افزار مجدداً حل نمایید.

فصل سیزدهم با عنوان فرمول‌بندی تراوش در نرم‌افزار به مفاهیم گسسته سازی معادلات دیفرانسیل جریان در خاک‌های اشباع و غیراشباع به روش المان محدود اختصاص داده شده است. جزئیات اضافی المان محدود به توابع درون‌یاب برمی گردد این توابع نیز در پیوست ب آورده شده‌اند.

به طور خلاصه مجموعه که در پیش‌رو دارید کتابی درباره مفاهیم تروش در خاک‌های اشباع و غیراشباع و معادلات حاکم بر آن‌ها و همچنین چگونگی شبیه‌سازی و محاسبه مسایل تراوش به کمک یک نرم‌افزار عددی قوی نظیرSEEP/W یا VADOSE/W از مجوعه نرم‌افزارهای GeoStudio می‌باشد. جزئیات چگونگی استفاده از دستورات مختلف نرم‌افزار GeoStudio و ویژگی‌های آن‌ها نیز در این کتاب ارایه شده است.

فهرست

عنوان **شماره صفحه**

فصل اول: تئوری تراوش آب در خاک ۱
۱-۱ نفوذ پذیری و نشت ۱
۱-۱-۱ قانون دارسی ۱
۱-۱-۲ عوامل مؤثر بر ضریب نفوذپذیری ۳
۱-۱-۳ ضریب نفوذپذیری مؤثر خاک‌های لایه‌ای ۴
۱-۱-۴ تغییرات نفوذپذیری با نسبت تخلخل در ماسه ها ۵
۱-۱-۵ اعتبار قانون دارسی ۶
۱-۲ محتوای حجمی آب و ضریب نفوذپذیری ۷
۱-۳ معادلات حاکم بر جریان سیال در محیط متخلخل ۱۱
۱-۳-۱ معادله پیوستگی جریان سیال در محیط متخلخل ۱۲
۱-۳-۲ معادله حرکت سیال در محیط متخلخل ۱۲
۱-۳-۳ تراوش در خاک غیراشباع ۱۶
۱-۳-۴ انتقال گاز ۱۹
۱-۳-۵ تبخیر واقعی ۲۲
۱-۴ شبکه‌های جریان در حالت جریان محصور ۲۴
۱-۴-۱ شبکه جریان در خاک‌های غیر همسان ۲۵
۱-۴-۲ نیروی نشت بر واحد حجم توده خاک ۲۶
۱-۴-۳ پدیده رگاب ۲۷
۱-۴-۴ محاسبه نشت آب از بدنه سد خاکی واقع بر بستر غیر قابل نفوذ ۳۰
۱-۵ ترسیم خط سطح آزاد جریان برای جریان غیرمحصور ۳۱
۱-۵-۱ نحوه‌ی ترسیم شبکه جریان برای سدهای خاکی ۳۳

فصل دوم: مدل‌سازی عددی ۳۷
۲-۱ مقدمه ۳۷
۲- ۲ مدل عددی چیست؟ ۳۸
۲-۳ مدل‌سازی در مهندسی ژئوتکنیک ۴۰
۲-۴ چرا مدل‌سازی؟ ۴۲
۲-۴-۱ پیش بینی‌های کمیتی ۴۳
۲-۴-۲ مقایسه راه کارها ۴۵
۲-۴-۳ شناسایی پارامترهای مؤثر ۴۷
۲-۵ چگونه مدل‌سازی کنیم؟ ۵۱
۲-۵-۱ حدس زدن ۵۱
۲-۵-۲ مدل‌سازی درست با شناخت مساله ۵۳
۲-۵-۳ ساده سازی هندسه ۵۳
۲- ۵-۴ ساده آغاز کنید ۵۴
۲-۵-۵ آزمایش‌های عددی انجام دهید ۵۵
۲-۵-۶ فقط اجزای ضروری را مدل‌سازی کنید ۵۶
۲-۵-۷ کار خود را با مشخصات تخمین زده شده برای مصالح آغاز کنید ۵۹
۲-۵-۸ در نتایج کنکاش کنید ۵۹
۲-۵-۹ نتایج به دست آمده را با نتایج مورد انتظار مقایسه کنید ۶۰
۲-۵-۱۰ دنیای واقعی را در خاطر داشته باشید ۶۰
۲-۶ چگونه مدل‌سازی نکنیم! ۶۱
۲-۷ یادآوری‌های پایانی ۶۲

فصل سوم: هندسه و شبکه‌بندی ۶۳
۳-۱ مقدمه ۶۳
۳-۲ اشیاء هندسی در Geostudio ۶۴
۳-۲-۱ نواحی خاکی، نقاط و خطوط ۶۵
۳-۲-۲ نقاط آزاد ۶۷
۳-۲-۳ خطوط آزاد ۶۷
۳-۲-۴ اجزا ء وجه مشترک ۶۹
۳-۲-۵ بازشو دایروی ۷۱
۳-۳ ایجاد شبکه ۷۱

۳-۳-۱ شبکه بندی ساختار یافته ۷۲
۳-۳-۲ شبکه بندی مثلثی و چهار گوش بی ساختار ۷۲
۳-۳-۳ شبکه بندی بی ساختار سه ضلعی ۷۳
۳-۳-۴ نواحی شبکه مثلثی ۷۳
۳-۳-۵ شبکه بندی مستطیلی ۷۴
۳-۴ لایه‌های سطحی ۷۵
۳-۵ اتصال نواحی ۷۸
۳-۶ شبکه‌بندی برای آنالیز گذرا ۷۹
۳-۸ قواعد المان‌بندی ۸۱
۳-۸-۱ گره‌های المان ۸۱
۳-۸-۲ تغییرات مجهول در پهنه المان ۸۲
۳-۸-۳ سازگاری شبکه بندی ۸۳
۳-۸-۴ انتگرال‌گیری عددی ۸۴
۳-۸-۵ متغیرهای ثانویه ۸۶
۳-۹ نواحی بیکران ۸۶
۳-۱۰ راه کارهای کلی برای شبکه‌بندی ۸۸
۳-۱۰-۱ تعداد المان ها ۸۹
۳-۱۰-۲ تأثیر مقیاس ترسیم ۸۹
۳-۱۰-۳ هدف از شبکه‌بندی ۹۰
۳-۱۰-۴ هندسه ساده شده ۹۲

فصل چهارم: مصالح و مشخصات آن‌ها ۹۵
۴-۱ مدل‌های رفتار خاک ۹۵
۴-۱-۱ مدل‌های مصالح در نرم‌افزار SEEP ۹۵
۴-۱-۲مدل‌های وجه مشترک VADOSE ۹۶
۴-۱-۳ قابلیت نگهداری آب در خاک- تابع محتوای آب ۹۷
۴-۱-۴ عوامل مؤثر بر محتوای آب ۹۹
۴-۲ انواع توابع ذخیره سازی و روش‌های تخمین زدن ۱۰۰
۴-۲-۱ روش تخمین اول: اندازه دانه‌ها (کواکس اصلاح شده) ۱۰۰
۴-۲-۲ روش تخمین دوم: توابع نمونه ۱۰۳
۴-۲-۳ روش معادلات بسته (الف) ۱۰۳

۴-۲-۴ روش معادلات بسته (ب) ۱۰۴
۴-۳ اندازه‌گیری تابع هدایت هیدرولیکی مصالح خاک ۱۰۵
۴-۳-۱ اندازه‌گیری مستقیم تابع محتوای آب ۱۰۵
۴-۴ ضریب فشردگی حجمی(m_v) ۱۰۶
۴-۵ هدایت هیدرولیکی ۱۰۶
۴-۶ هدایت هیدرولیکی زمین یخ زده ۱۰۹
۴-۷ روش‌های تخمین تابع هدایت ۱۱۱
۴-۷-۱ روش اول (Fredlund et al., 1994) ۱۱۱
۴-۷-۲ روش دوم (Corey & Green,1971) ۱۱۲
۴-۳-۷ روش سوم (Van Genuchten,1980) ۱۱۳
۴-۸ پارامترهای مدل وجه مشترک ۱۱۴
۴-۹ قابلیت انتقال و ذخیره سازی ۱۱۵
۴-۱۰ حساسیت نتایج هیدرولیکی نسبت به مشخصات مصالح ۱۱۶
۴-۱۰-۱ تغییرات مکش نظیر ورود هوا(AEV) ۱۱۶
۴-۱۰-۲ تغییرات بر روی هدایت هیدرولیکی اشباع ۱۱۸
۴-۱۰-۳ تغییرات شیب تابع محتوای حجمی آب (VWC) ۱۲۱
۴-۱۰-۴ تغییرات در محتوای حجمی آب ماندگار ۱۲۳
۴-۱۱ توابع حرارتی ۱۲۴
۴-۱۱-۱ تابع محتوای آب یخ‌نزده ۱۲۴
۴-۱۱-۲ ضریب هدایت حرارتی ۱۲۵
۴-۱۱-۳ تخمین ضریب هدایت حرارتی ۱۲۶
۴-۱۱-۴ مقادیر معمول ضریب هدایت حرارتی ۱۲۷
۴-۱۱-۵ ظرفیت حرارتی ۱۲۸
۴-۱۱-۶ تخمین ظرفیت حرارتی ۱۲۸
۴-۱۱-۷ مثال‌ها ۱۲۹
۴-۱۱-۸ مقادیر معمول ظرفیت حرارتی ۱۳۰

فصل پنجم: شرایط مرزی ۱۳۱
۵-۱ معرفی ۱۳۱
۵-۲ اصول ۱۳۲
۵-۳ موقعیت شرایط مرزی ۱۳۴

۵-۴ شرایط مرزی هد ۱۳۵
۵-۴-۱ شرایط مرزی هد در یک سد ۱۳۷
۵-۴-۲ شرایط فشار ثابت ۱۳۹
۵-۴-۳ شرایط هد دور دست ۱۴۰
۵-۵ جریان‌های مرزی مشخص ۱۴۱
۵-۶ چشمه و چاهک ۱۴۵
۵-۷ جبهه تراوش ۱۴۶
۵-۸ زهکش آزاد (گرادیان واحد) ۱۴۸
۵-۹ نفوذ و تبخیر در سطح زمین ۱۵۰
۵-۱۰ شرایط مرزی دور دست ۱۵۱
۵-۱۱ توابع مرزی ۱۵۴
۵-۱۱-۱ کلیات ۱۵۴
۵-۱۱-۲ هد نسبت به زمان ۱۵۴
۵-۱۱-۳ هد بر حسب حجم ۱۵۶
۵-۱۱-۴ جریان گرهی Q نسبت به زمان ۱۵۸
۵-۱۱-۵ سرعت واحد جریان نسبت به زمان ۱۵۹
۵-۱۱-۶ تابع اصلاحگر ۱۶۰
۵-۱۲ شرایط مرزی خاک- جو ۱۶۱
۵-۱۳ شرایط مرزی دما و گاز ۱۶۱

فصل ششم: انواع آنالیز ۱۶۳
۶-۱ حالت پایا ۱۶۳
۶-۱-۱ انواع شرایط مرزی در حالت پایا ۱۶۴
۶-۲ حالت گذرا ۱۶۵
۶-۲-۱ شرایط اولیه ۱۶۵
۶-۲-۲ رسم سطح آب اولیه ۱۶۷
۶-۲-۳ تعیین شرایط اولیه در مصالح ۱۶۸
۶-۲-۴ عدم وجود شرایط اولیه ۱۶۸
۶-۳ گام‌های زمانی ۱۶۸
۶-۳-۱ فرمولاسیون انتگرال زمانی در المان محدود ۱۶۹
۶-۳-۲ مسایل با اندازه‌های گام زمانی ۱۶۹

۶-۳-۳ قانون‌های کلی برای ایجاد گام‌های زمانی ۱۷۰
۶-۳-۴ گام زمانی سازگار شونده ۱۷۱
۶-۴ آنالیز مرحله ای/ چند گانه ۱۷۱
۶-۵ تقارن محوری ۱۷۳
۶-۶ نمای پلان (فقط سفره آب زیر زمینی محدود) ۱۷۴

فصل هفتم: توابع در GeoStudio ۱۷۷
۷-۱ توابع منحنیs شکل ۱۷۷
۷-۱-۱ شیب توابع منحنیs شکل ۱۷۸
۷-۲ توابع خطی (Linear function) ۱۷۹
۷-۳ توابع پله ای(Step function) ۱۷۹
۷-۴ رابطه بسته ریاضی برای توابع محتوای آب ۱۸۰
۷-۵ توابع افزودنی(Add-in functions) ۱۸۰

فصل هشتم: مسایل عددی ۱۸۳
۸-۱ مقدمه ۱۸۳
۸-۲ هم‌گرایی ۱۸۴
۸-۲-۱ حد نصاب‌های برداری ۱۸۵
۸-۳ خطای بقای جرم آب در یک تحلیل گذرا ۱۸۸
۸-۴ توابع مشخصات مصالح با شیب تند ۱۹۰
۸-۵ بهبود هم‌گرایی ۱۹۱
۸-۵-۱ پارامترهای کنترل تابع هدایت هیدرولیکی ۱۹۱
۸-۵-۲ شیب تابع محتوای حجمی آب ۱۹۲
۸-۶ مرتبه انتگرال‌گیری گاوس ۱۹۳
۸-۷ حلال معادله (مستقیم یا مستقیم- موازی) ۱۹۴
۸-۸ گام‌های زمانی ۱۹۵
۸-۸-۱ گام بندی زمانی سازگارشونده ۱۹۵

فصل نهم: شبیه‌سازی شبکه‌های جریان ۱۹۹
۹-۱ مقدمه ۱۹۹
۹-۲ خطوط هم پتانسیل ۲۰۰
۹-۳ مسیرهای جریان ۲۰۱

۹-۴ کانال‌های جریان ۲۰۱
۹-۵ مقادیر جریان ۲۰۳
۹-۶ فشارهای برکنش ۲۰۴
۹-۷ محدودیت ها ۲۰۴
۹-۸ نتیجه گیری ۲۰۶

فصل دهم: نمایش نتایج ۲۰۷
۱۰-۱ نتایج حالت گذرا در مقابل حالت پایا ۲۰۷
۱۰-۲ اطلاعات المان و گره ۲۰۸
۱۰-۳ ترسیم نمودار از داده‌های گرهی و گاوسی ۲۱۰
۱۰-۴ مقادیر تهی ۲۱۲
۱۰-۵ سطح ایستابی ۲۱۳
۱۰-۶ خطوط تراز ۲۱۳
۱۰-۷ تصویر مقادیر نقاط گاوسی در گره ها ۲۱۴
۱۰-۸ منحنی میزان ۲۱۵
۱۰-۹ انیمیشن ۲۱۵
۱۰-۱۰ بردارهای سرعت و مسیرهای جریان آب ۲۱۶
۱۰-۱۰-۱ محاسبه گرادیان‌ها و سرعت ها ۲۱۶
۱۰-۱۰-۲ بردارهای سرعت ۲۱۷
۱۰-۱۰-۳ مسیرهای جریان ۲۱۷
۱۰-۱۱ مقاطع جریان ۲۱۹
۱۰-۱۱-۱ تئوری مقطع جریان ۲۱۹
۱۰-۱۱-۲ کاربرد مقطع جریان ۲۲۱

فصل یازدهم: نکات و ترفندهای مدل سازی ۲۲۳
۱۱-۱ مقدمه ۲۲۳
۱۱-۲ واحدهای مهندسی مسأله ۲۲۳
۱۱-۳ محل مقطع جریان ورودی و خروجی ۲۲۴
۱۱-۴ مقادیر دبی آب در زهکش ۲۲۵
۱۱-۵ جریان واحد یا جریان کل ۲۲۶
۱۱-۶ جریان بالای خط ایستابی ۲۲۶

۱۱-۷ مرز فشار با عمق ۲۲۷
۱۱-۸ آنالیز تبخیر ۲۲۷

فصل دوازدهم: مثال‌های تشریحی ۲۲۹
۱۲-۲ مثال تشریحی اول: مطالعه پارامترهای مؤثر در یک سد ۲۳۰
۱۲-۲-۱ شبکه بندی سد ۲۳۱
۱۲-۲-۲ تشریح شرایط مرزی ورودی ۲۳۱
۱۲-۲-۳ شکل شبکه جریان سد به همراه خط آزاد آب ۲۳۲
۱۲-۲-۴ نمودار دبی عبوری در هر نقطه از فیلتر ۲۳۲
۱۲-۲-۵ نمودار فشار آب منفذی در طول سد ۲۳۳
۱۲-۲-۶ شکل توزیع بردارهای سرعت روی بدنه سد ۲۳۳
۱۲-۲-۷ دیاگرام هد کل در طول سد ۲۳۴
۱۲-۲-۸ خطوط هم پتانسیل ۲۳۴
۱۲-۲-۹ تحلیل حساسیت دبی نشت ۲۳۵
۱۲-۳ مثال تشریحی دوم: محاسبه مقادیر جریان در یک سد ۲۴۶
۱۲-۴ سد همگن با پنجه‌ای زهکش ۲۵۱
۱۲-۵ جریان پایدار زیر دیوار آب‌بند ۲۵۲
۱۲-۶ جریان پایدار زیر دیوار آب‌بند خاک ناهمسانگرد ۲۵۳
۱۲-۷ تراوش در هسته سد با تغییر مقادیر نفوذپذیری اشباع ۲۵۴
۱۲-۸ مدل سازی فشار آب حفره‌ای برای آنالیز پایداری شیب ۲۵۴
۱۲-۹ نفوذ داخل لایه پوشش ۲۵۵
۱۲-۱۰ صحت سنجی در ماسه ۲۵۶
۱۲-۱۱ پر و خالی شدن سریع مخزن ۲۵۶
۱۲-۱۲ نفوذ دو بعدی ازحوضچه و بالارفتن سطح آب ۲۵۷
۱۲-۱۳ پرشدن حوضچه (مقایسه عملکرد فشار و حجم) ۲۵۸
۱۲-۱۴ شبکه‌بندی نهرهای کنار جاده درهنگام بارش باران ۲۵۸
۱۲-۱۵ زهکش ها ۲۵۹
۱۲-۱۶ جریان شعاعی به درون چاه ۲۵۹
۱۲-۱۷ استهلاک فشار آب حفره‌ای اضافی ۲۶۰
۱۲-۱۹ صحت سنجی ذوب و انجماد ۲۶۲
۱۲-۲۰ صحت سنجی انتشار گاز ۲۶۲

۱۲-۲۱ شبیه‌سازی روان‌آب و جمع شدن آب ۲۶۳
۱۲-۲۲ شبیه‌سازی دوبعدی روان‌آب و جمع شدن آب ۲۶۴
۱۲-۲۳ تایید تبخیر حقیقی ویلسون ۲۶۵
۱۲-۲۴ مثال آموزشی VADOSE ۲۶۵

فصل سیزدهم: فرمول‌بندی تراوش در نرم‌افزار ۲۶۷
۱۳-۱ معادلات دیفرانسیل جزئی جریان آب ۲۶۷
۱۳-۱۴ معادلات المان محدود جریان آب ۲۶۸
۱۳-۱۵ انتگرال زمانی ۲۷۰
۱۳-۱۶ انتگرال عددی ۲۷۰
۱۳-۱۷ ماتریس هدایت هیدرولیکی ۲۷۲
۱۳-۱۸ ماتریس جرم ۲۷۳
۱۳-۱۹ بردار دبی مرزی ۲۷۴
۱۳-۲۰ جریان وابسته به تراکم ۲۷۶
پیوست الف - شروع ساده ۲۷۹
پیوست ب- توابع درون‌یابی ۲۹۳
پیوست ج- چک لیست آنالیز تبخیر ۳۰۳
منابع و مراجع ۳۰۷