

الحمد لله الذي
خلقنا من
الحمم



دانشگاه شاهد

دانشکده فنی و مهندسی

پایان نامه کارشناسی ارشد

مهندسی عمران - مکانیک خاک و پی

مدل سازی رفتار الاستوپلاستیک خاک‌های غیراشباع

استاد راهنما: دکتر حسن قاسم زاده

استاد مشاور: دکتر محمد حسن کرمی

محمد حسین سجودی

دی ماه ۱۳۹۲

تاریخ: ۹۲، ۱۱، ۵

صور تجلسه دفاع پایان نامه کارشناسی ارشد

جلسه دفاع پایان نامه کارشناسی ارشد آقای/ خانم محمدحسین سجودی دانشجوی کارشناسی ارشد رشته عمران به شماره دانشجویی ۹۰۷۵۲۳۵۰۰ به ارزش ۶ واحد، رأس ساعت ۱۳:۰۰، روز شنبه، مورخ ۹۲/۱۱/۵ در محل دانشگاه شاهد، تحت عنوان: "مدل سازی رفتار الاستوپلاستیک خاکهای غیر اشباع"، تشکیل گردید.
کمیته داوری پایان نامه کارشناسی ارشد پس از استماع دفاعیات و طرح پرسش های لازم در زمینه علمی و تحقیقاتی مرتبط با پایان نامه نامبرده، ارزشیابی نهایی خود را به شرح ذیل، اعلام نمودند:
پایان نامه نامبرده با نمره (به عدد) و (به حروف) و با درجه مورد تایید قرار گرفت/ نگرفت.

امتیازات، طبق ماده ۲۰ آیین نامه آموزشی دوره کارشناسی ارشد ناپیوسته، مصوب جلسه ۷۱۴ مورخ ۸۸/۱/۱۵ وزارت علوم، تحقیقات و فناوری:
عالی: ۱۹ تا ۲۰، بسیار خوب: ۱۸/۹۹ تا ۱۸، خوب: ۱۷/۹۹ تا ۱۶، قابل قبول: ۱۵/۹۹ تا ۱۴، غیر قابل قبول: نمره کمتر از ۱۴

اعضای کمیته داوری پایان نامه کارشناسی ارشد	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	نام دانشگاه	امضاء
استاد راهنمای اول	حسن کمالزاده	دانشیار	فولادشهر	
استاد راهنمای دوم (در صورت وجود)				
استاد مشاور اول	محمد سجودی	استادیار	شهر	
استاد مشاور دوم (در صورت وجود)				
داور داخلی و یا خارجی	محمدصادق عسکری	دانشیار	مرکز بصیر	
داور داخلی و یا خارجی	محمد رضانورد	استاد	خرامه بصیر	
نماینده تحصیلات تکمیلی (بدون نمره)	دکتر شریه	استادیار	شهر	

توضیحات ناظر تحصیلات تکمیلی:

مسئله مندر
-
-
-
-

امضاء

تاریخ:

۹۲، ۱۱، ۵

نام و نام خانوادگی ناظر تحصیلات تکمیلی:

دکتر شریه



اظہار نامہ دانشجو

شماره:

تاریخ:

اینجانب محمد حسین سجودی دانشجوی کارشناسی ارشد رشته مهندسی عمران گرایش مکانیک خاک و پی دانشکده فنی مهندسی دانشگاه شاهد، گواهی می دهم که پایان نامه/ رساله تدوین شده حاضر با عنوان؛ "مدل سازی رفتار الاستوپلاستیک خاک های غیراشباع" به راهنمایی استاد محترم جناب آقای دکتر حسن قاسم زاده، توسط شخص اینجانب انجام و صحت و اصالت مطالب تدوین شده در آن، مورد تأیید است و چنان چه هر زمان، دانشگاه کسب اطلاع کند که گزارش پایان نامه/ رساله حاضر صحت و اصالت لازم را نداشته، دانشگاه حق دارد، مدرک تحصیلی اینجانب را مسترد و ابطال نماید هم چنین اعلام می دارد در صورت بهره گیری از منابع مختلف شامل؛ گزارش های تحقیقاتی، رساله، پایان نامه، کتاب، مقالات تخصصی و غیره، به منبع مورد استفاده و پدید آورنده آن به طور دقیق ارجاع داده شده و نیز مطالب مندرج در پایان نامه/ رساله حاضر تاکنون برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی توسط اینجانب و یا سایر افراد به هیچ کجا ارایه نشده است. در تدوین متن پایان نامه/ رساله حاضر، چارچوب (فرمت) مصوب تدوین گزارش های پژوهشی تحصیلات تکمیلی دانشگاه شاهد به طور کامل مراعات شده و نهایتاً این که، کلیه حقوق مادی ناشی از گزارش پایان نامه/ رساله حاضر، متعلق به دانشگاه شاهد می باشد.

نام و نام خانوادگی دانشجو(دست نویس):.....

امضاء دانشجو:

تاریخ:

تقدیم

به ساحت مقدس نبی اکرم، حضرت محمد مصطفی (صلی الله علیه آله وسلم)

به ارواح طیّیه شهدای اسلام

به پیشگاه همه ی مردان و زنانی که از تلاش و کوشش آنان سپیده ی بلوغ علوم سرزد

و

روح کراتقدر استاد ارجمند، مرحوم دکتر نادر اکرامی نسب

سپاس می‌گویم خداوند منّان را که به من توفیق آموختن داد.

لازم می‌دانم در این جا از زحمات استاد ارجمند، جناب آقای دکتر حسن قاسم‌زاده که در تمام مراحل انجام این پایان‌نامه یاریگر من بودند، تشکر کرده و از زحمات ایشان قدردانی کنم. همچنین از مشاوره‌ها و راهنمایی‌های اساتید گرامی آقایان دکتر محمدحسن کرمی و دکتر سیدعلی قریشیان امیری که با دلسوزی من را در این مسیر یاری نمودند کمال تشکر را دارم. در پایان بر خود لازم می‌دانم از زحمات بی‌دریغ پدر و مادرم که در رشد و تعالی من کوشیدند و همسر عزیزم که همیشه همیار و همراه من بوده، از صمیم قلب قدردانی نمایم.

چکیده

بیشترین حجم لایه‌های خاک نزدیک به سطح زمین از خاک‌های غیراشباع تشکیل شده که رفتار مکانیکی آن‌ها با خاک‌های اشباع و خشک کاملاً متفاوت می‌باشد. در این خاک‌ها به دلیل وجود مکش بافتی نوعی تأثیر توأم میان رفتار هیدرولیکی و مکانیکی وجود دارد. از این رو ارایه یک مدل رفتاری که بتواند ویژگی‌های مکانیکی و هیدرولیکی این خاک‌ها را به خوبی بیان نماید، از اهمیت بالایی برخوردار است.

در این تحقیق یک مدل رفتاری الاستو-پلاستیک جهت بیان رفتار توأم هیدرولیکی و مکانیکی در خاک‌های غیراشباع بر پایه‌ی مدل ارایه شده توسط قاسم‌زاده و قریشیان، ارایه شده است. مدل مذکور رفتار هیدرومکانیک خاک‌های غیراشباع را در بارگذاری همه‌جانبه بیان نموده، که در این تحقیق، با توسعه‌ی این مدل، مدلی هیدرومکانیک جهت شبیه‌سازی رفتار خاک‌های غیراشباع تحت شرایط بارگذاری سه‌محوری ایجاد گردیده است. مدل بیان شده می‌تواند تأثیر تغییرات برگشت ناپذیر محتوای حجمی آب را بر رفتار تنش-کرنش و به صورت متقابل تأثیر کرنش‌های پلاستیک بر رفتار هیدرولیکی موجود در خاک غیراشباع را بیان نماید. پلاستیسیته‌های سطح زیربارگذاری و سطوح مرزی به ترتیب جهت بیان رفتار مکانیکی و رفتار هیدرولیکی در نظر گرفته شده و با استفاده از قوانین سخت شوندگی توأم، رفتار هیدرومکانیک موجود در خاک‌های غیراشباع بیان شده‌اند. در انتها نتایج بدست آمده از پیش‌بینی مدل با داده‌های به دست آمده از انجام آزمایش سه محوری بر روی خاک‌های متورم شونده و ریزشی صحت سنجی گردید که نتایج قابل قبولی حاصل شد.

کلید واژه: رفتار الاستوپلاستیک، خاک غیراشباع، خاک متورم شونده، خاک ریزشی

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فهرست جدول‌ها.....	د
فهرست شکل‌ها.....	ه
فهرست علائم و نشانه‌ها.....	ط
فصل ۱- مقدمه.....	۱
۱-۱- سوالات تحقیق.....	۲
۲-۱- ضرورت انجام تحقیق.....	۲
۳-۱- هدف تحقیق.....	۳
۴-۱- روش تحقیق.....	۳
۵-۱- ساختار تحقیق.....	۳
فصل ۲- معرفی خاک‌های غیراشباع.....	۵
۱-۲- مقدمه.....	۵
۲-۲- فاز آب.....	۵
۳-۲- فاز هوا.....	۸
۲-۳-۱- حل شدن هوا در آب.....	۹
۴-۲- ویسکوزیته (لزجت).....	۱۲
۵-۲- قانون جریان حالت پایدار برای آب.....	۱۳
۶-۲- فاز اندرکنش آب و هوا (پوسته‌ی قابل انقباض).....	۱۴
۷-۲- مکش در خاک.....	۱۶
۸-۲- مویینگی.....	۱۸
۹-۲- منحنی مشخصه‌ی خاک‌های غیراشباع (SWCC).....	۱۹
۲-۱۰- روابط وزنی- حجمی:.....	۲۰
۲-۱۰-۱- پوکی.....	۲۰
۲-۱۰-۲- نسبت تخلخل.....	۲۱
۳-۱۰-۲- درجه اشباع.....	۲۱
۴-۱۰-۲- درصد رطوبت.....	۲۲
۲-۱۱- متغیرهای حالات تنش:.....	۲۲
۲-۱۲- نتیجه‌گیری.....	۲۳
فصل ۳- تاریخچه تحقیقات.....	۲۵
۱-۳- مقدمه.....	۲۵
۲-۳- تحقیقات Alonso و همکاران ۱۹۸۷.....	۲۶

۲۶.....	فرمولاسیون مدل برای شرایط تنش همه جانبه.....	۱-۲-۳
۳۰.....	مدل در شرایط تنش سه محوری.....	۲-۲-۳
۳۳.....	تحقیقات Wheeler و همکاران ۲۰۰۳.....	۳-۳
۳۳.....	تأثیر رفتار هیستریزیس هیدرولیکی بر رفتار مکانیکی خاک.....	۱-۳-۳
۳۵.....	مدل رفتاری الاستو-پلاستیک توأم.....	۲-۳-۳
۳۵.....	کرنش های الاستیک و پلاستیک در خاک:.....	۱-۲-۳-۳
۳۵.....	درجه ی اشباع الاستیک و پلاستیک:.....	۲-۲-۳-۳
۳۶.....	متغیرهای تنش و کرنش:.....	۳-۲-۳-۳
۳۶.....	سطوح تسلیم افزایش مکش و کاهش مکش.....	۳-۳-۳
۳۸.....	سطوح تسلیم در خاک های غیراشباع:.....	۴-۳-۳
۳۹.....	رفتار توأم هیدرولیکی و مکانیکی.....	۵-۳-۳
۴۱.....	تحقیقات Sheng و همکاران ۲۰۰۴.....	۴-۳
۴۲.....	رفتار حجمی.....	۱-۴-۳
۴۲.....	رفتار هیدرولیکی.....	۲-۴-۳
۴۳.....	توابع تسلیم.....	۳-۴-۳
۴۵.....	قوانین سخت شوندگی.....	۴-۴-۳
۴۵.....	تحقیقات Sun و همکاران ۲۰۰۷.....	۵-۳
۴۵.....	بررسی تأثیر نسبت تخلخل بر رفتار (SWCC).....	۱-۵-۳
۴۷.....	مدل الاستو-پلاستیک:.....	۲-۵-۳
۴۹.....	فرمولاسیون مدل رفتاری تحت شرایط تنش متقارن:.....	۳-۵-۳
۵۰.....	تحقیقات Muraleetharan و همکاران ۲۰۰۹.....	۶-۳
۵۱.....	رفتار هیدرولیکی.....	۱-۶-۳
۵۱.....	مدول الاستو پلاستیک مویینگی.....	۲-۶-۳
۵۲.....	مدل هیدرومکانیک توأم.....	۳-۶-۳
۵۳.....	تحقیقات Liu و Muraleetharan ۲۰۱۲.....	۷-۳
۵۴.....	تحقیقات Ghosemzadeh و Ghoreishian ۲۰۱۳.....	۸-۳
۵۵.....	رفتار هیدرولیکی.....	۱-۸-۳
۵۶.....	قوانین سخت شوندگی توأم.....	۲-۸-۳
۵۷.....	رفتار مکانیکی.....	۳-۸-۳
۵۸.....	نتیجه گیری.....	۹-۳
۶۰.....	فصل ۴- الگوی هیدرومکانیک پیشنهادی.....	
۶۰.....	مقدمه.....	۱-۴
۶۰.....	کلیات سطح زیر بارگذاری.....	۲-۴
۶۲.....	معادلات رفتاری الاستو پلاستیک:.....	۱-۲-۴
۶۵.....	کلیات پلاستیسیته ی سطوح مرزی.....	۳-۴
۶۵.....	ساختار مدل.....	۱-۳-۴

۶۷.....	۴-۴- مدل هیدرومکانیک پیشنهادی.....
۶۷.....	۴-۴-۱- متغیرهای تنش در خاک‌های غیراشباع.....
۶۹.....	۴-۴-۲- کرنش‌های الاستیک و پلاستیک.....
۶۹.....	۴-۴-۳- سطوح تسلیم.....
۷۱.....	۴-۴-۴- رفتار توأم هیدرولیکی و مکانیکی.....
۷۱.....	۴-۴-۵- رفتار هیدرومکانیک مدل پیشنهادی.....
۷۱.....	۴-۴-۵-۱- رفتار هیدرولیکی.....
۷۲.....	۴-۴-۵-۲- رفتار مکانیکی.....
۷۲.....	۴-۴-۵-۳- قوانین سخت شوندگی توأم :.....
۷۳.....	۴-۴-۶- روابط الاستو-پلاستیک.....
۷۳.....	۴-۴-۶-۱- کرنش حجمی الاستیک، کرنش برشی الاستیک و سهم حجمی آب الاستیک:.....
۷۳.....	۴-۴-۶-۲- کرنش حجمی و برشی پلاستیک:.....
۷۵.....	۴-۴-۶-۳- سهم حجمی آب پلاستیک:.....
۷۷.....	۴-۵- نتیجه‌گیری.....
۷۹.....	۵- فصل کالبراسیون و صحت سنجی مدل پیشنهادی.....
۷۹.....	۵-۱- مقدمه.....
۷۹.....	۵-۲- تعیین فراسنج‌های مورد استفاده در مدل.....
۸۰.....	۵-۳- کالبراسیون.....
۸۰.....	۵-۴- مقایسه‌ی نتایج مدل با داده‌های آزمایشگاهی خاک Pear Clay.....
۸۱.....	۵-۴-۱- نمونه خاک شماره ۱.....
۸۵.....	۵-۴-۲- نمونه خاک شماره ۲.....
۹۱.....	۵-۴-۳- نمونه خاک شماره ۳.....
۹۳.....	۵-۵- مقایسه‌ی نتایج مدل با داده‌های آزمایشگاهی خاک Bentonit-Kaolin.....
۹۹.....	۵-۶- مقایسه نتایج مدل با داده‌های آزمایشگاهی بر روی خاک SpesWhite Kaolin.....
۱۰۲.....	۵-۷- آنالیز حساسیت.....
۱۰۷.....	۵-۸- نتیجه‌گیری.....
۱۰۸.....	۶- فصل نتیجه‌گیری و پیشنهادات.....
۱۰۸.....	۶-۱- نتیجه‌گیری.....
۱۰۹.....	۶-۲- پیشنهاداتی برای ادامه تحقیقات.....
۱۱۰.....	فهرست مراجع :.....

فهرست جدول‌ها

عنوان	صفحه
جدول ۱-۲ چگالی هوا در فشارهای مطلق متفاوت و دماهای متغیر در رطوبت نسبی ۵۰٪ [۱].....	۹
جدول ۲-۲ تصحیح مقدار چگالی هوا برای رطوبت‌های نسبی غیر از ۵۰٪ [۱].....	۹
جدول ۳-۲ ویسکوزیته‌ی هوا در فشار اتمسفر در دماهای مختلف [۱].....	۱۲
جدول ۴-۲ ویسکوزیته‌ی آب در فشار اتمسفر در دماهای مختلف [۱].....	۱۲
جدول ۵-۲ مقادیر کشش سطحی در درجه حرارت‌های مختلف.....	۱۵
جدول ۱-۴ روابط A,B,C,D,E.....	۷۵
جدول ۱-۵: فراسنج‌های مکانیکی.....	۸۱
جدول ۲-۵: فراسنج‌های هیدرولیکی.....	۸۲
جدول ۳-۵: فراسنج‌های مکانیکی.....	۸۵
جدول ۴-۵: فراسنج‌های هیدرولیکی.....	۸۶
جدول ۵-۵: فراسنج‌های مکانیکی.....	۹۱
جدول ۶-۵: فراسنج‌های هیدرولیکی.....	۹۲
جدول ۷-۵: فراسنج‌های مکانیکی.....	۹۵
جدول ۸-۵: فراسنج‌های هیدرولیکی.....	۹۵
جدول ۹-۵: فراسنج‌های مکانیکی.....	۹۹
جدول ۱۰-۵: فراسنج‌های هیدرولیکی.....	۱۰۰

۱	شکل ۱-۱ تقسیم بندی علم مکانیک خاک [۱]
۵	شکل ۱-۲: ساختار قطبی مولکول آب
۶	شکل ۲-۲ پدیده‌ی کشش سطحی
۶	شکل ۳-۲ پدیده‌ی مویینگی
۷	شکل ۴-۲ چگالی آب خالص تحت فشار و دمای متغیر [۱]
۷	شکل ۵-۲ خطوط نشان دهنده‌ی شرایط آب [۱]
۱۰	شکل ۶-۲ ساختار شبکه‌ای مولکول‌های آب [۱]
۱۰	شکل ۷-۲ تأثیر هوای حل شده در چگالی آب برای دماهای مختلف [۱]
۱۱	شکل ۸-۲ سیستم شامل سیلندر، پیستون و سنگ متخلخل [۱]
۱۳	شکل ۹-۲ ویسکوزیته‌ی آب و هوا در دماهای مختلف [۱]
۱۵	شکل ۱۰-۲ پدیده‌ی کشش سطحی در سطح تماس آب و هوا [۱]
۱۸	شکل ۱۱-۲ مقدار مکش کل در رطوبت‌های نسبی در دماهای ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درجه سانتی‌گراد [۱۵]
۱۸	شکل ۱۲-۲ تأثیر شعاع آب بین حفرات خاک در تغییر مویینگی [۲]
۱۹	شکل ۱۳-۲ نیروی کشش سطحی در لوله مویین [۱]
۲۰	شکل ۱۴-۲ منحنی SWCC [۱۶]
۲۴	شکل ۱۵-۲ دایره‌ی موهر در فضای تنش‌های $\sigma - \tau - s$ [۱]
۲۷	شکل ۱-۳ منحنی‌های تحکیم برای خاک‌های اشباع و غیراشباع [۴]
۲۸	شکل ۲-۳ سطح تسلیم LC در فضای تنش P-S [۴]
۲۹	شکل ۳-۳ تعریف مکش تسلیم [۴]
۲۹	شکل ۴-۳ سطوح تسلیم SI و LC در فضای $p-s$ [۴]
۳۱	شکل ۵-۳ سطوح تسلیم در فضای $p-q$ [۴]
۳۱	شکل ۶-۳ سطوح تسلیم در فضای $p-s$ [۴]
۳۲	شکل ۷-۳ معیار تسلیم در فضای $p-q-s$ [۴]
۳۳	شکل ۸-۳ آب حجمی و آب منیسک [۶]
۳۵	شکل ۹-۳ منحنی مشخصه‌ی خاک‌های غیراشباع [۶]
۳۶	شکل ۱۰-۳ جابجایی سطح تداخل آب و هوا [۶]
۳۷	شکل ۱۱-۳ منحنی هیستریزس هیدرولیکی در پروسه‌ی الاستو-پلاستیک [۶]
۳۷	شکل ۱۲-۳ حرکت مستقیم سطوح تسلیم SI و SD به دلیل تسلیم بر روی SI [۶]
۳۸	شکل ۱۳-۳ سطوح تسلیم SI و SD و LC در شرایط بارگذاری همه جانبه [۶]
	شکل ۱۴-۳ تغییر نیروی بین ذرات خاک در اثر تغییر آب منیسک ایجاد شده به واسطه‌ی تغییر مکش

- ۳۹ [۶]
- شکل ۳-۱۵ توسعه مدل رفتاری الاستو-پلاستیک ارائه شده در فضای تنش‌های $p^* - q - s$ [۶] ۳۹
- شکل ۳-۱۶ جابجایی توأم سطوح تسلیم LC در اثر تغییر پلاستیک درجه‌ی اشباع [۶] ۴۰
- شکل ۳-۱۷ تأثیر کرنش‌های حجمی پلاستیک بر جابجایی منحنی‌های مرطوب شوندگی و خشک شوندگی اولیه [۶] ۴۱
- شکل ۳-۱۸ جابجایی توأم سطوح تسلیم SI، SD در اثر کرنش‌های حجمی پلاستیک [۶] ۴۱
- شکل ۳-۱۹ رفتار هیدرولیکی تحت نسبت تخلخل ثابت [۲۳] ۴۳
- شکل ۳-۲۰ سطوح تسلیم را در فضای تنش‌های $p^* - q - s$ [۲۳] ۴۴
- شکل ۳-۲۱ منحنی مشخصه خاک طی نسبت تخلخل‌های مختلف در پروسه‌ی مرطوب شوندگی [۹] ۴۶
- شکل ۳-۲۲ رابطه‌ی بین نسبت تخلخل و درجه‌ی اشباع در بارگذاری همه جانبه [۹] ۴۶
- شکل ۳-۲۳ مدل ارائه شده برای منحنی مشخصه‌ی خاک‌های غیراشباع در دو نسبت تخلخل متفاوت [۹] ۴۷
- شکل ۳-۲۴ سطوح تسلیم LC, SI, SD در شرایط تنش همه جانبه [۹] ۴۸
- شکل ۳-۲۵ سطح تسلیم LC در صفحه‌ی تنش‌های $p' - q$ [۹] ۴۹
- شکل ۳-۲۶ مدل SWCC ارائه شده توسط ویلر و همکاران [۲۴] ۵۰
- شکل ۳-۲۷ اندازه‌گیری منحنی SWCC برای ماسه خوب دانه بندی شده [۲۴] ۵۱
- شکل ۳-۲۸ منحنی SWCC [۲۴] ۵۲
- شکل ۳-۲۹ سطح تسلیم ارائه شده توسط تاییبات و دافالیاس در فضای تنش‌های سه‌محوری [۲۵] ۵۴
- شکل ۳-۳۰ سطوح تسلیم LC, SD, SI و تغییرات آن‌ها در شرایط بارگذاری همه جانبه [۱۰] ۵۵
- شکل ۳-۳۱ جابجایی منحنی‌های مرطوب شوندگی اولیه و خشک شوندگی ثانویه در اثر تغییر در کرنش‌های حجمی پلاستیک [۱۰] ۵۷
- شکل ۳-۳۲ [۱۰] ۵۸
- شکل ۴-۱ سطوح تسلیم نرمال و زیربارگذاری [۱۴] ۶۱
- شکل ۴-۲ تغییرات تابع U با تغییرات R [۱۴] ۶۳
- شکل ۴-۳ منحنی هیستریزیس ماده تحت شرایط بارگذاری و باربرداری [۱۲] ۶۶
- شکل ۴-۴ سطوح تسلیم افزایش مکش، کاهش مکش و سطح تسلیم بارگذاری ۷۰
- شکل ۴-۵ نمای شماتیکی از سطوح تسلیم SI, SD و LC در فضای تنش‌های $p^* - q - s$ [۱۰] ۷۱
- شکل ۵-۱ کالیبره کردن پیش‌بینی مدل و داده‌های آزمایشگاهی در شرایط بارگذاری سه‌محوری و مکش ثابت ۱۴۷ کیلو پاسکال میان تغییرات کرنش محوری و کرنش حجمی ۸۱
- شکل ۵-۲ مقایسه پیش‌بینی مدل و داده‌های آزمایشگاهی در شرایط بارگذاری سه‌محوری و مرطوب شوندگی میان تغییرات کرنش محوری و کرنش حجمی ۸۳
- شکل ۵-۳ مقایسه نتایج پیش‌بینی مدل و داده‌های آزمایشگاهی در شرایط بارگذاری سه‌محوری و مرطوب شوندگی میان تغییرات کرنش و نسبت تنش محوری به جانبی ۸۳
- شکل ۵-۴ مقایسه نتایج پیش‌بینی مدل و داده‌های آزمایشگاهی در شرایط بارگذاری سه‌محوری و

- مرطوب شوندگی و خشک شوندگی میان تغییرات درجه اشباع و نسبت تنش محوری به جانبی ۸۴
- شکل ۵-۵ مقایسه پیش‌بینی مدل و داده‌های آزمایشگاهی در شرایط بارگذاری سه‌محوری و مکش ثابت میان تغییرات کرنش و نسبت تنش محوری به جانبی ۸۴
- شکل ۵-۶ مقایسه نتایج پیش‌بینی مدل و داده‌های آزمایشگاهی در شرایط بارگذاری سه‌محوری و مکش ثابت میان تغییرات درجه اشباع و نسبت تنش محوری به جانبی ۸۵
- شکل ۵-۷ مقایسه پیش‌بینی مدل و داده‌های آزمایشگاهی در شرایط بارگذاری همه جانبه و مرطوب شوندگی میان تغییرات تنش خالص نرمال و درجه اشباع ۸۷
- شکل ۵-۸ مقایسه پیش‌بینی مدل و داده‌های آزمایشگاهی در شرایط بارگذاری همه جانبه و مرطوب شوندگی میان تغییرات تنش خالص نرمال و تخلخل ۸۷
- شکل ۵-۹ مقایسه پیش‌بینی مدل و داده‌های آزمایشگاهی در شرایط بارگذاری همه جانبه و مرطوب شوندگی میان تغییرات مکش و درجه‌ی اشباع ۸۸
- شکل ۵-۱۰ مقایسه پیش‌بینی مدل و داده‌های آزمایشگاهی در شرایط بارگذاری همه جانبه و مرطوب شوندگی میان تغییرات مکش و تخلخل ۸۸
- شکل ۵-۱۱ مقایسه پیش‌بینی مدل و داده‌های آزمایشگاهی در شرایط بارگذاری همه جانبه و مرطوب شوندگی میان تغییرات تنش خالص نرمال و درجه‌ی اشباع ۸۹
- شکل ۵-۱۲ مقایسه پیش‌بینی مدل و داده‌های آزمایشگاهی در شرایط بارگذاری همه جانبه و مرطوب شوندگی میان تغییرات تنش خالص نرمال و تخلخل ۸۹
- شکل ۵-۱۳ مقایسه پیش‌بینی مدل و داده‌های آزمایشگاهی در شرایط بارگذاری همه جانبه و مرطوب شوندگی میان تغییرات مکش و درجه‌ی اشباع ۹۰
- شکل ۵-۱۴ مقایسه پیش‌بینی مدل و داده‌های آزمایشگاهی در شرایط بارگذاری همه جانبه و مرطوب شوندگی میان تغییرات مکش و تخلخل ۹۰
- شکل ۵-۱۵ کالیبره کردن پیش‌بینی مدل و داده‌های آزمایشگاهی میان تغییرات تنش نرمال خالص و حجم مخصوص ۹۱
- شکل ۵-۱۶ مقایسه پیش‌بینی مدل و داده‌های آزمایشگاهی در شرایط بارگذاری همه جانبه و سیکل‌های مرطوب شوندگی و خشک شوندگی میان تغییرات نسبت آب حجمی و مکش ۹۲
- شکل ۵-۱۷ مقایسه پیش‌بینی مدل و داده‌های آزمایشگاهی در شرایط بارگذاری همه جانبه و سیکل‌های مرطوب شوندگی و خشک شوندگی میان تغییرات تنش خالص نرمال و حجم مخصوص ۹۳
- شکل ۵-۱۸ دستگاه آزمایش سه‌محوری مورد استفاده توسط شارما [۲۹] ۹۴
- شکل ۵-۱۹ کالیبراسیون مدل و داده‌های آزمایشگاهی میان تغییرات تنش خالص نرمال و حجم مخصوص ۹۵
- شکل ۵-۲۰ مقایسه پیش‌بینی مدل و داده‌های آزمایشگاهی در شرایط بارگذاری همه جانبه و مکش ثابت میان تغییرات تنش خالص نرمال و حجم مخصوص ۹۶
- شکل ۵-۲۱ مقایسه پیش‌بینی مدل و داده‌های آزمایشگاهی در شرایط بارگذاری همه جانبه و مکش ثابت میان تغییرات تنش خالص نرمال و درجه اشباع ۹۶

- شکل ۵-۲۲ مقایسه پیش‌بینی مدل و داده‌های آزمایشگاهی در شرایط بارگذاری همه جانبه و مکش ثابت
۹۷ میان تغییرات تنش خالص نرمال و درجه اشباع
- شکل ۵-۲۳ مقایسه پیش‌بینی مدل و داده‌های آزمایشگاهی در شرایط بارگذاری همه جانبه و سیکل‌های
۹۸ مرطوب شوندگی و خشک شوندگی میان تغییرات تنش خالص نرمال و حجم مخصوص
- شکل ۵-۲۴ مقایسه پیش‌بینی مدل و داده‌های آزمایشگاهی در شرایط بارگذاری همه جانبه و سیکل‌های
۹۸ مرطوب شوندگی و خشک شوندگی میان تغییرات تنش خالص نرمال و درجه‌ی اشباع
- شکل ۵-۲۵ کالیبره کردن پیش‌بینی مدل و داده‌های آزمایشگاهی میان تنش انحرافی و کرنش محوری
۹۹ در شرایط بارگذاری سه‌محوری و مکش ثابت 0kPa
- شکل ۵-۲۶ مقایسه پیش‌بینی مدل و داده‌های آزمایشگاهی میان تنش انحرافی و کرنش محوری در
۱۰۰ شرایط بارگذاری سه‌محوری و مکش ثابت 100kPa
- شکل ۵-۲۷ مقایسه پیش‌بینی مدل و داده‌های آزمایشگاهی میان تنش انحرافی و کرنش محوری در
۱۰۱ شرایط بارگذاری سه‌محوری و مکش ثابت 300kPa
- شکل ۵-۲۸ مقایسه پیش‌بینی مدل و داده‌های آزمایشگاهی میان حجم مخصوص و کرنش محوری در
۱۰۱ شرایط بارگذاری سه‌محوری و مکش ثابت 100kPa
- شکل ۵-۲۹ مقایسه پیش‌بینی مدل و داده‌های آزمایشگاهی میان حجم مخصوص و کرنش محوری در
۱۰۲ شرایط بارگذاری سه‌محوری و مکش ثابت 300kPa
- شکل ۵-۳۰ تأثیر تغییرات b_1 بر پیش‌بینی مدل و مقایسه‌ی آن با داده‌های آزمایشگاهی
۱۰۳
- شکل ۵-۳۱ تأثیر تغییرات d_1 بر پیش‌بینی مدل و مقایسه‌ی آن با داده‌های آزمایشگاهی
۱۰۳
- شکل ۵-۳۲ تأثیر تغییرات Γ^e بر پیش‌بینی مدل و مقایسه‌ی آن با داده‌های آزمایشگاهی
۱۰۴
- شکل ۵-۳۳ تأثیر تغییرات λ_g بر پیش‌بینی مدل و مقایسه‌ی آن با داده‌های آزمایشگاهی
۱۰۴
- شکل ۵-۳۴ تأثیر تغییرات k بر پیش‌بینی مدل و مقایسه‌ی آن با داده‌های آزمایشگاهی
۱۰۵
- شکل ۵-۳۵ تأثیر تغییرات L بر پیش‌بینی مدل و مقایسه‌ی آن با داده‌های آزمایشگاهی
۱۰۵
- شکل ۵-۳۶ تأثیر تغییرات u بر پیش‌بینی مدل و مقایسه‌ی آن با داده‌های آزمایشگاهی
۱۰۶
- شکل ۵-۳۷ تأثیر تغییرات m بر پیش‌بینی مدل و مقایسه‌ی آن با داده‌های آزمایشگاهی
۱۰۶
- شکل ۵-۳۸ تأثیر تغییرات α_2 بر پیش‌بینی مدل و مقایسه‌ی آن با داده‌های آزمایشگاهی
۱۰۷

فهرست علائم و نشانه‌ها

عنوان	علامت اختصاری
مکش بافتی	s
فشار هوا	p_a
فشار آب	p_w
تنش مؤثر نرمال	p^*
تنش خالص نرمال	p
تنش نرمال کل	p_t
تنش انحرافی	q
سهم حجمی آب	n_w
سهم حجمی آب در بیشترین مقدار مکش	$n_{w_{res}}$
سهم حجمی آب در مکش صفر	$n_{w_{sat}}$
مدول موینگی پلاستیک	Γ^p
مدول موینگی الاستیک	Γ^e
شیب خط تورم الاستیک در صفحه‌ی $V - \ln p^*$	K
حجم مخصوص	V
تابع سخت شوندگی	F
متغیر سخت شوندگی	H
فراسنج شرح دهنده‌ی افزایش چسبندگی با مکش	L

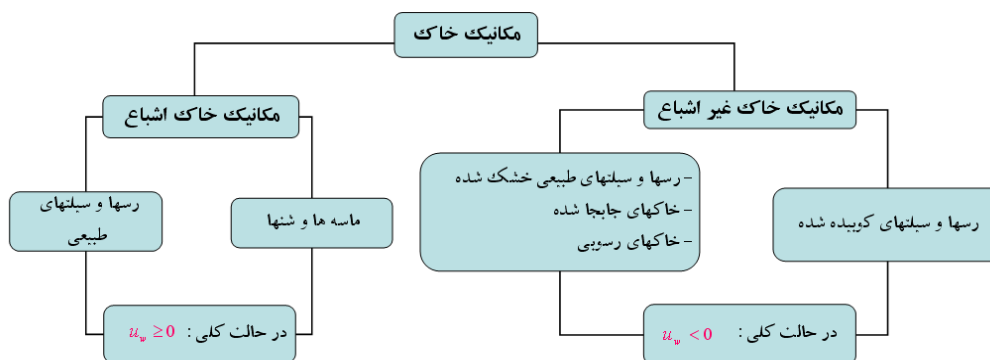
فصل ۱- مقدمه

علم مکانیک خاک غیراشباع از جمله مباحث مطرح روز در مجامع علمی بین المللی در حیطه مهندسی ژئوتکنیک است و با وجود آن که هر ساله نتایج مطالعات و تحقیقات در این زمینه بصورت مقالات و کتب مختلف ارایه می گردد هنوز تحقیقات بیشتری در این زمینه لازم می باشد. مطالعات خاکی که امروزه به صورت رایج و کاربردی مطرح می شوند، در واقع علم مکانیک خاک کلاسیک می باشد که در این علم محیط های خاکی، معمولاً خشک یا کاملاً اشباع فرض شده اند.

امروزه با گسترش دانش و تکنولوژی و نیاز به تأسیسات و امکانات عمرانی در سرتاسر دنیا و با توجه به آن که بخش وسیعی از مساحت مناطق دنیا جزء مناطق خشک و نیمه خشک محسوب می شوند، دانستن خصوصیات مکانیکی خاک های نیمه خشک امری ضروری است. در این خاک ها تراز سطح آب زیرزمینی در اعماق پایین زمین واقع شده است. در نتیجه لایه های خاک نزدیک به سطح زمین که رفتار مهندسی آن ها دارای اهمیت است در حالت غیراشباع قرار دارند. مسائل مورد نظر در مکانیک خاک غیراشباع مشابه مسائل مکانیک خاک اشباع است. تشابه وضعیت همه خاک های غیراشباع، وجود فشارهای منفی آب حفره ای در آن ها است، که موجب ایجاد مکش^۱ در این خاک ها می گردد. تفاوت عمده ی بین خاک های اشباع و غیراشباع نیز در مکش است به گونه ای که روابط مکانیک خاک کلاسیک در مورد خاک های غیراشباع دیگر جوابگو نمی باشد.

در مکانیک خاک کلاسیک، خاک ها در حالت کلی یا در حالت کاملاً اشباع بوده و یا کاملاً خشک می باشند و هیچ آبی در حفرات خاک وجود ندارد، این دو حالت ایده آل هستند، به طوری که بیشتر محیط های خاکی در وضعیتی ما بین این دو حالت قرار داشته و در واقع غیراشباع می باشند.

بر همین اساس زمینه اصلی علم مکانیک خاک به دو قسمت مطالعه خاک های اشباع و مطالعه خاک های غیراشباع تقسیم می شود شکل ۱-۱.



شکل ۱-۱ تقسیم بندی علم مکانیک خاک [۱]

^۱ Suction

اما با توجه به آن که حدود نیم قرن از اولین تلاش‌ها جهت پایه‌گذاری مکانیک خاک غیراشباع می‌گذرد و علی‌رغم پیشرفت‌های زیاد در این زمینه، هنوز قوانین رفتاری خاک‌های غیراشباع^۱ به طور کامل تعیین نشده‌است. [۱ و ۲ و ۳].

۱-۱- سوالات تحقیق

تغییر در حجم آب بین حفرات و متناسب با آن ایجاد مکش بافتی تأثیر مشخصی بر رفتار تنش- کرنش در خاک غیراشباع می‌گذارد، از طرفی به واسطه‌ی تنش در خاک و ایجاد کرنش ابعاد حفرات خاک دچار تغییراتی می‌شوند که این امر موجب تغییر در مکش درون خاک می‌گردد که به این رفتار تأثیر توأم هیدرومکانیک گفته می‌شود، از این رو آرایه مدل رفتاری که بتواند این تأثیر توأم هیدرومکانیک موجود در خاک‌های غیراشباع را به خوبی بیان نماید از اهمیت بالایی برخوردار است. بر این اساس در دو دهه‌ی گذشته تلاش‌های بسیاری جهت بیان این رفتار توأم هیدرومکانیکی با آرایه‌ی مدل‌های رفتاری مختلفی توسط محققانی نظیر: آلونسو^۲ [۴]، جن^۳ [۵]، ویلر^۴ [۶]، سانچز^۵ [۷]، گالیپولی^۶ [۸]، سان^۷ [۹] و بسیاری محققان دیگر صورت گرفته‌است.

در این بین قاسم‌زاده و قریشیان [۱۰] درصدد اصلاح مدل‌های رفتاری آرایه شده توسط سایر محققین برآمدند و با آرایه‌ی یک مدل رفتاری الاستو-پلاستیک تأثیر توأم هیدرومکانیک موجود در خاک‌های غیراشباع، مخصوصاً خاک‌های مسئله‌دار را به نحو مطلوبی الگوسازی نموده‌اند. اما این مدل، تنها توانایی شبیه‌سازی رفتار خاک‌های غیراشباع را در شرایط بارگذاری همه جانبه دارا می‌باشد. از این رو سؤال اصلی این تحقیق، توسعه‌ی مدل مذکور، در شرایط بارگذاری سه‌محوری و برشی می‌باشد، به گونه‌ای که بتوان قابلیت این مدل را در شبیه‌سازی رفتار هیدرومکانیک توأم موجود در خاک‌های غیراشباع مسئله دار افزایش داد.

۱-۲- ضرورت انجام تحقیق

انجام هر تحقیق بر مبنای نیازها و ضرورت‌هایی شکل می‌گیرد که نشان دهنده‌ی میزان اهمیت آن پژوهش می‌باشد. ضرورت‌های انجام تحقیق پیش رو عبارت‌اند از:

۱- خاک‌های غیراشباع بخش وسیعی از مناطق جهان را تشکیل می‌دهند، از این رو بیان رفتار هیدرومکانیکی این خاک‌ها از اهمیت قابل توجهی برخوردار است.

۲- شناخت و شبیه‌سازی رفتار هیدرومکانیکی خاک‌های غیراشباع مسئله‌دار، از جمله خاک‌های

¹ Unsaturated Soil

² Alonso

³ Gen

⁴ Wheeler

⁵ Sanchez

⁶ Gallipoli

⁷ Sun

ریزشی (Collapsible) و متورم شونده در اثر رطوبت (Expansive) جهت جلوگیری از خرابی و بهینه شدن هزینه‌های حاصل از اقدامات عمرانی امری ضروری است.

۳- لزوم توسعه‌ی مدل‌های مختلف موجود در خاک‌های غیراشباع و نیاز به ارایه‌ی یک مدل جامع از دیگر ضروریات انجام این تحقیق می‌باشد.

۳-۱- هدف تحقیق

هدف از انجام این تحقیق الگوسازی رفتار هیدرولیکی و مکانیکی خاک‌های غیراشباع تحت بارگذاری سه‌محوری می‌باشد، به گونه‌ای که سیکل‌های مختلف مرطوب شوندگی و خشک شوندگی نیز در این مدل الگوسازی خواهند شد.

۴-۱- روش تحقیق

در این تحقیق بر اساس مطالعات کتابخانه‌ای و با جستجو در مقالات موجود در پایگاه‌ها و بانک‌های اطلاعاتی، کتاب‌های مرجع و پایان نامه‌ها، اقدام به مطالعه پیرامون مدل‌های مینا نموده و جهت بررسی بیشتر، برنامه‌ی کامپیوتری روابط حاصل از این مدل‌ها را نوشته، و به مقایسه‌ی نتایج آن‌ها با داده‌های آزمایشگاهی می‌پردازیم.

پس از آن با استفاده از پلاستیسیته‌های سطح زیر بارگذاری، سطوح مرزی و قوانین سخت شوندگی همه جانبه، اقدام به توسعه مدل‌های مینا نموده و با نوشتن برنامه کامپیوتری مدل هیدرومکانیک ارایه شده به صحت سنجی آن می‌پردازیم. در این صحت سنجی نتایج بدست آمده حاصل از مدل را با داده‌های بدست آمده از آزمایش بر روی خاک‌های PearClay (خاک گسیخته شونده) و خاک‌های ترکیب یافته از Bentonit- Kaolin و SpesWhite Kaolin (خاک‌های به شدت متورم شونده) مقایسه نمودیم که نتایج تطبیق قابل قبولی با داده‌های آزمایشگاهی داشتند.

۵-۱- ساختار تحقیق

این تحقیق به طور کلی شامل ۶ فصل می‌باشد:

فصل اول شامل کلیات تحقیق می‌باشد. در فصل دوم به معرفی ویژگی خاک‌های غیراشباع شامل: مشخصه‌های فیزیکی و هیدرولیکی فازهای تشکیل دهنده، روابط وزنی - حجمی، متغیرهای تنش، مکش بافتی و... می‌پردازیم، سپس در فصل سوم نتایج تحقیقات محققانی چون آلونسو، ویلر، شنگ^۱، سان، مورالیتاران^۲، قاسم زاده و قریشیان و... ارایه گردیده است.

در فصل چهارم الگوی هیدرومکانیک پیشنهادی و پلاستیسیته‌های مورد استفاده در این الگو شامل

¹ Sheng

² Muraleetharan

پلاستیسیته‌ی سطوح مرزی ارایه شده توسط دافالیاس و پوپوف^۱ [۱۱]، [۱۲] و پلاستیسیته‌ی سطح زیربارگذاری ارایه شده توسط هاشی‌گوشی و همکاران^۲ [۱۳]، [۱۴] بیان شده است.

در فصل پنجم به نحوه‌ی کالیبراسیون مدل پیشنهادی و صحت سنجی آن توسط مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی پرداخته‌ایم و در فصل ششم نیز نتیجه‌گیری و پیشنهادات برای تحقیقات بعدی را بیان نموده‌ایم.

^۱ Dafalias and Popov

^۲ Hashiguchi et al.

فصل ۲- معرفی خاک‌های غیراشباع

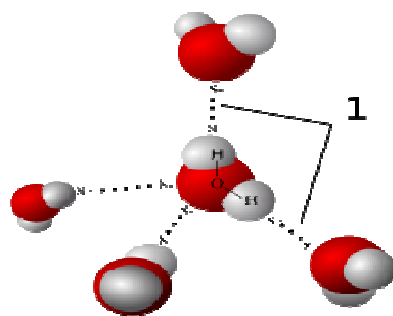
۲-۱- مقدمه

درک و فهم رفتار هیدرومکانیک خاک‌های غیراشباع نیازمند شناخت مشخصه‌های هیدرولیکی و مکانیکی فازهای تشکیل‌دهنده‌ی این خاک‌ها می‌باشد. ابتدا در این فصل مشخصه‌های هیدرولیکی و مکانیکی فازهای تشکیل‌دهنده‌ی خاک غیراشباع به طور مختصر بیان شده است، پس از آن روابط وزنی-حجمی موجود در خاک غیراشباع، و سپس متغیرهای تنش ارایه شده در این خاک‌ها بیان شده اند.

خاک غیراشباع^۱ معمولاً به صورت یک سیستم سه فازه متشکل از دانه‌های خاک، آب و هوا در نظر گرفته می‌شود. ولی بعضی از محققین فصل مشترک آب و هوا^۲ را نیز به عنوان فاز چهارم در نظر گرفته‌اند، چرا که معتقدند اولاً مشخصات آن با فازهای مجاور متفاوت است و ثانیاً دارای سطوح مرزی مشخص می‌باشد [۱]. در ادامه هر کدام از این فازها را به ترتیب شرح داده می‌شود:

۲-۲- فاز آب

آب یک ترکیب با فرمول شیمیایی H_2O است. یک مولکول آب شامل دو اتم هیدروژن که با پیوند کووالانسی به یک اتم اکسیژن وصل شده‌است می‌باشد شکل ۱-۲.



شکل ۱-۲: ساختار قطبی مولکول آب

آب در طبیعت به سه حالت مایع، جامد و گاز و به اشکال فراوانی در سطح زمین ظاهر می‌شود: بخار آب و ابرها در آسمان، اقیانوس‌ها، توده‌های یخ شناور، یخچال‌های طبیعی، رودخانه‌ها در کوه‌ها و...

از جمله ویژگی‌های آب خاصیت کشش سطحی بالای آن است، به عبارت دیگر چسبنده والاستیک است که این خود باعث این می‌شود که قطره‌های آب دور هم جمع شوند و به هم بچسبند شکل ۲-۲. کشش سطحی در اثر موینگی ایجاد می‌شود که اجازه می‌دهد آب از ریشه گیاهان و از میان مویرگ‌های

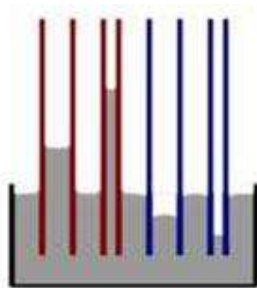
¹ Unsaturated Soil

² Air-water interface

خونی بدنمان به سمت بالا برود شکل ۲-۳.



شکل ۲-۲ پدیده‌ی کشش سطحی



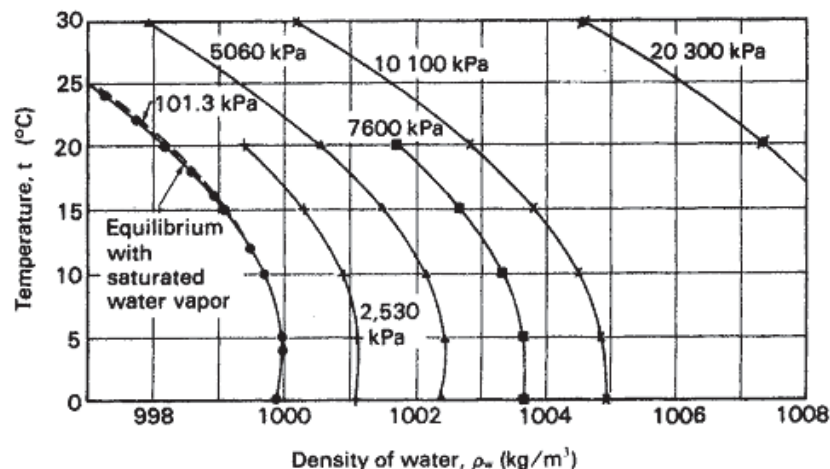
شکل ۳-۲ پدیده‌ی موینگی

آب یک حلال خوب است و اغلب به عنوان حلال جهانی شناخته می‌شود. موادی که در آب حل می‌شوند، نمک‌ها، شکرها، اسیدها، بازها و بعضی از گازها مخصوصاً اکسیژن و کربن دی اکسید می‌باشند. این مواد به عنوان مواد آب دوست (هیدروفیلیک) و موادی که در آب مخلوط نمی‌شوند (چربی‌ها و روغن‌ها) به عنوان مواد آب گریز (هیدروفوبیک) شناخته شده‌اند.

نقطه‌ی جوش آب و همه دیگر مایعات به فشار هوا وابسته است. به عنوان مثال آب در قله اورست در 68°C و در سطح دریا در 100°C به جوش می‌آید. اما در آب‌های عمیق اقیانوس، نزدیک دریچه‌های زمین گرمایی با توجه به این که دما می‌تواند به هزاران درجه برسد، آب به همان صورت مایع باقی می‌ماند.

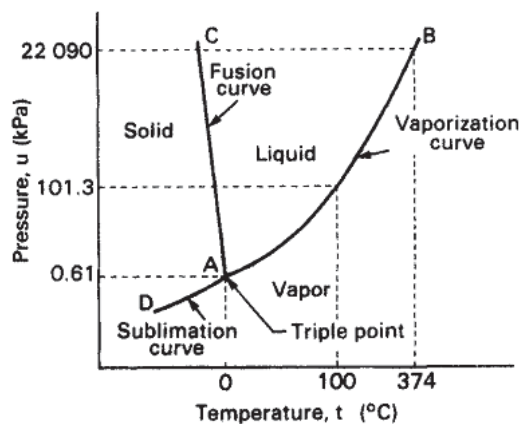
علاوه بر این‌ها آب دارای خاصیتی غیر عادی است، زمانی که سرد می‌شود و به شکل جامد (یخ) در می‌آید چگالی‌اش کم می‌شود، علت این امر آن است که زمانی که آب به صورت جامد در می‌آید ۹٪ بیشتر حجم اشغال می‌کند به همین دلیل یخ روی آب شناور می‌ماند.

آب مقطر تحت فشار بخار اشباع، آب اشباع خالص نامیده می‌شود. چگالی آب اشباع خالص، به صورت آزمایشگاهی باید اندازه‌گیری شود. شکل ۲-۴. چگالی آب خالص تحت فشار و دمای متغیر را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۲ چگالی آب خالص تحت فشار و دمای متغیر [۱]

در مسائل مکانیک خاک، تغییرات چگالی آب با تغییرات دما نسبت به تغییرات چگالی آب با تغییرات فشار بسیار با معنی تر است. شکل ۵-۲ نشان دهنده حالات فیزیکی آب در طبیعت است.



شکل ۵-۲ خطوط نشان دهنده شرایط آب [۱]

منحنی AB نشان دهنده شرایط تبخیر، منحنی AC نشان دهنده شرایط ذوب و منحنی AD نشان دهنده شرایط تصعید می‌باشد. منحنی بخار AB، بعضاً به عنوان منحنی فشار بخار آب نیز نامیده می‌شود. این منحنی، مقادیر ترکیب دما و فشار را برای شرایط مایع و بخار در شرایط تعادل به دست می‌دهد. منحنی ذوب AC، شرایط جامد و مایع را جدا می‌کند و منحنی شرایط تصعید AD شرایط جامد و بخار را جدا می‌کند. منحنی‌های بخار، ذوب و تصعید یکدیگر را در نقطه A قطع می‌کنند. این نقطه به عنوان نقطه سه گانه آب^۱ نامیده می‌شود که در آن سه حالت جامد، مایع و گاز آب به یک تعادل در کنار هم می‌رسند. نقطه سه گانه آب دارای دمای صفر درجه و فشار ۰/۶۱۱ kPa می‌باشد. در این تحقیق منظور از آب و یا فاز آب شرایط آب در حالت مایع می‌باشد.

^۱ Triple point

۲-۳- فاز هوا

هوا بخشی از اتمسفر است که در تنفس و فتوسنتز استفاده می‌شود. هوای خشک دارای ۷۸/۹٪ نیتروژن، ۲۰/۹۵٪ اکسیژن، ۰/۹۳٪ آرگون، ۰/۰۳۹٪ کربن دی اکسید، حدود ۱٪ بخار آب و مقدار کمی از دیگر گازها می‌باشد.

چگالی ρ_a و حجم مخصوص V_{a0} هوا با استفاده از روابط زیر بیان می‌گردند:

$$\rho_a = \frac{M_a}{V_a} \quad (۱-۲)$$

$$V_{a0} = \frac{V_a}{M_a} \quad (۲-۲)$$

که در روابط فوق، M_a و V_a به ترتیب حجم هوا بر حسب مترمکعب و جرم هوا بر حسب کیلوگرم می‌باشند.

رفتار هوا با ترکیبی از رفتار گازهای مختلف و تغییر در مقدار بخار آب گره خورده‌است، زمانی که در هوا، بخار آب وجود نداشته باشد، به این ترکیب هوای خشک گفته می‌شود، و در غیر این صورت به این ترکیب هوای مرطوب اطلاق می‌گردد.

چگالی هوا با استفاده از قانون گازهای ایده آل^۱ و قانون بویل^۲ به صورت زیر بدست می‌آید:

$$\rho_a = \frac{W_a}{RT} \bar{P}_a \quad (۳-۲)$$

که در رابطه‌ی فوق W_a برابر وزن مولکولی هوا بر حسب $\frac{kg}{kmol}$ ، R ثابت جهانی گازها، T دمای مطلق بر حسب درجه‌ی کلون و $\bar{P}_a$ فشار مطلق هوا بر حسب kPa می‌باشد.

وزن مولکولی هوا با تغییر در هر کدام از مواد تشکیل دهنده‌ی هوا تغییر می‌کند، که این تغییر در نتیجه بر روی چگالی هوا تأثیر می‌گذارد. عامل دیگری که سبب تغییر در چگالی هوا می‌شود رطوبت نسبی^۳ است که از رابطه‌ی زیر بدست می‌آید:

$$R_H = \frac{\bar{P}_v(100)}{\bar{P}_{v0}} \quad (۴-۲)$$

در رابطه‌ی فوق R_H برابر است با رطوبت نسبی $(\frac{P}{P_s})$ ، $\bar{P}_v$ برابر فشار جزئی بخار آب در هوا و $\bar{P}_{v0}$ برابر فشار اشباع بخار آب در دمای یکسان می‌باشد.

جدول ۱-۲ مقدار چگالی هوا را برای فشارهای مطلق هوا $\bar{P}_a$ و دماهای متغیر نشان می‌دهد. این جدول برای هوا با رطوبت نسبی ۵۰٪ و ۰/۰۴٪ دی اکسید کربن محلول در هوا بیان شده‌است. در صورتی که

^۱ Ideal Gas

^۲ Boyle's law

^۳ relative humidity

هوا دارای رطوبت نسبی غیر از ۵۰٪ باشد باید طبق جدول ۲-۲ بر روی مقادیر، تصحیح انجام گیرد. اگر چه مقدار این تصحیح کوچک است، این مطلب قابل تشریح است، به نسبتی که رطوبت نسبی افزایش می‌یابد، چگالی هوا کاهش می‌یابد.

جدول ۲-۱ چگالی هوا در فشارهای مطلق متفاوت و دماهای متغیر در رطوبت نسبی ۵۰٪ [۱]

Density of Air, ρ_a (kg/m ³)			
Absolute Air Pressure, (kPa)	Temperature, t^0 (°C)		
	10	20	30
80	0.982	0.946	0.910
85	1.043	1.005	0.968
90	1.105	1.065	1.025
95	1.167	1.124	1.083
100	1.228	1.184	1.140
101	1.240	1.196	1.152
105	1.290	1.243	1.198

جدول ۲-۲ تصحیح مقدار چگالی هوا برای رطوبت‌های نسبی غیر از ۵۰٪ [۱]

Density Adjustments for Humidity (kg/m ³)		
Relative Humidity, RH (%)	Temperature, t^0 (°C)	
	10	20
20	+0.003	+0.006
25	+0.003	+0.005
30	+0.002	+0.004
35	+0.002	+0.003
40	+0.001	+0.002
45	+0.001	+0.001
50	0	0
55	-0.001	-0.001
60	-0.001	-0.002
65	-0.002	-0.003
70	-0.002	-0.004
75	-0.003	-0.005
80	-0.003	-0.006

۲-۳-۱ حل شدن هوا در آب

مولکول‌های آب به دلیل دارا بودن یک ساختار شبکه‌ای، می‌توانند توسط مولکول‌های گاز پر شوند. همان‌گونه که در شکل ۲-۶ نشان داده شده مولکول‌های هوا در میان مولکول‌های آب قرار گرفته‌اند که با