فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فهرست مطالب.....هشت

فهرست اشکال.....یازده

فهرست جداول.....سیزده

چکیده.....۱

۱-فصل اول.....۲

۱ – ۱ مقدمه.....۲

۱ – ۲ اهداف تحقیق.....۳

۲-فصل دوم.....٤

۲ – ۱ خاک.....۴

۲ – ۲ تخلخل.....۵

۲ – ۳ اندازه گیری تخلخل خاک.....۶

۲-۳-۱ روش مستقیم.....۶

۲-۳-۲ روش غیر مستقیم.....۸

۲ – ٤ تراکم خاک.....۸

۲ – ٥ رطوبت خاک.....۹

۲ – ٦ اندازه‌گیری رطوبت خاک.....۱۰

۲-۶-۱ روش مستقیم.....۱۰

۲-۶-۲ روش غیر مستقیم.....۱۱

۲ – ۷ آزمون‌های غیر مخرب.....۱۲

۲ – ۸ آزمون‌های غیر مخرب فراصوتی.....۱۳

۲ – ۹ اصول فیزیکی امواج فراصوت.....۱۳

۲-۹-۱ انواع امواج فراصوت و کاربرد آنها.....۱۴

۲-۹-۲ برهمکنش امواج فراصوتی و ماده.....۱۶

۲-۹-۳ انتشار امواج فراصوتی در ماده.....۱۷

۲-۹-۴ شدت فراصوت.....۱۷

۲-۹-۵ سرعت امواج فراصوتی.....۱۸

۲-۹-۶ مقاومت ظاهری صوت.....۱۸

۲-۹-۷ روش های ارزیابی صوتی.....۱۹

۲-۹-۸ تضعیف امواج فراصوتی.....۱۹

۲-۹-۹ ناحیه مرده، میدان نزدیک و میدان دور.....۲۰

۲-۹-۱۰ تراگذرهای فراصوتی.....۲۲

۲ – ۱۰ روش‌های اندازه‌گیری امواج و پردازش سیگنال فراصوتی.....۲۳

۲ – ۱۱ پیشینه تحقیق اندازه‌گیری تخلخل و رطوبت خاک.....۲۴

۲ – ۱۲ پیشینه تحقیق فراصوت در کشاورزی ۲۶
۲ – ۱۳ رفتار صوت در خاک ۲۷
۲ – ۱٤ بکارگیری امواج فراصوتی در خاک ۲۹
۲ – ۱٥ جمع بندی ۳۱
۳-فصل سوم ۳۳
۳ – ۱ سامانه اندازه‌گیر خصوصیات فراصوتی خاک ۳۳
۳-۱-۱ صفحه کنترل دستگاه ۳۴
۳-۱-۲ تراگذرهای فراصوتی ۳۶
۳-۱-۳ مدارات الکترونیک ۳۶
۳-۱-۴ پردازشگر ۳۷
۳-۱-۵ مولد بسامد قابل تنظیم ۳۸
۳-۱-۶ چیپ برنامه ریزی شده ۳۸
۳-۱-۷ کلیدزنی و ترانسفورمر تپ ۳۸
۳-۱-۸ تغذیه ولتاژ بالا ۳۹
۳-۱-۹ بخش تقویت و فیلتر امواج ارسالی ۳۹
۳-۱-۱۰ بخش پیش تقویت و فیلتر امواج دریافتی ۳۹
۳-۱-۱۱ بخش تقویت تکمیلی و فیلتر امواج دریافتی ۳۹
۳-۱-۱۲ بخش واسط قیاسی به رقمی ۳۹
۳-۱-۱۳ نرم افزار رایانه‌ای (نمایش و اندازه گیری) ۴۰
۳-۱-۱۴ نویزهای الکترومغناطیسی و حل مشکل آن ۴۱
۳-۱-۱۵ تنظیمات و مراحل کار با سامانه فراصوت ۴۱
۳-۱-۱۶ روش کار با سامانه ۴۲
۳ – ۲ واسنجی سامانه فراصوتی ۴۲
۳-۲-۱ واسنجی زمان عبور ۴۲
۳-۲-۲ واسنجی دامنه ۴۲
۳-۲-۳ واسنجی بسامد ۴۳
۳ – ۳ ویژگی‌های خاک مورد مطالعه ۴۴
۳ – ٤ آزمایشات مقدماتی ۴۵
۳-۴-۱ روش تهیه خاک ۴۵
۳-۴-۲ آزمایشات سری اول ۴۵
۳-۴-۳ آزمایشات سری دوم ۴۶
۳ – ٥ موانع بکارگیری امواج فراصوت در اندازه گیری رطوبت و تخلخل خاک ۴۷
۳-۵-۱ ویژگی امواج و یا مبدل های ارسال و دریافت امواج فراصوت ۴۸
۳-۵-۲ خصوصیات خاک مورد آزمایش ۵۰
۳-۵-۳ ثبت امواج توسط کاوشگر گیرنده ۵۱
۳ – ٦ آزمایشات اصلی ۵۲

۳-۶-۱ تهیه نمونه با تخلخل و رطوبت معین ۵۲
۳-۶-۲ بسامد و ولتاژ تراگذرهای فراصوت ۵۴
۳-۶-۳ بافت خاک ۵۴
۳-۶-۴ روش انجام آزمایش ۵۴
۳ – ۷ آزمایش مزرعه‌ای ۵۵
۳ – ۸ پردازش سیگنال دریافتی ۵۶
۳ – ۹ تحلیل داده‌ها ۵۶
٤-فصل چهارم ۵۹
٤ – ۱ مقدمه ۵۹
٤ – ۲ واسنجی دستگاه اندازه‌گیری ۵۹
٤ – ۳ نتایج میزان تضعیف و تحلیل آن ۶۱
۴-۳-۱ خاک لوم رسی در بسامدهای ۷۵kHz و ۱۲۵kHz ۶۱
۴-۳-۲ میزان تضعیف موج در سه بافت خاک در بسامد ۷۵kHz ۶۵
۴-۳-۳ تحلیل اثر بافت خاک ۷۲
٤ – ٤ سرعت ۷۴
۴-۴-۱ سرعت عبور امواج فراصوت در خاک لوم رسی ۷۴
۴-۴-۲ سرعت موج در بسامد ۷۵kHz در سه نوع خاک ۷۸
۴-۴-۳ تحلیل اثر بافت خاک بر تغییرات سرعت موج ۸۴
٤ – ٥ آزمایشات مزرعه‌ای ۸۵
٥-فصل پنجم ۸۷
٥ – ۱ نتیجه‌گیری ۸۷
٥ – ۲ پیشنهادها ۸۸
٦-ضمیمه ۹۰

فهرست شکل‌ها

شکل ۱-۱: انتشار انواع اموج و حرکت ذرات..... ۱۵
شکل ۲-۲: ارزیابی صوتی..... ۲۰
شکل ۲-۳: میدان نزدیک و میدان دور موج صوتی..... ۲۱
شکل ۲-۴: اثر مستقیم و برگشت پیزوالکتریک..... ۲۲
شکل ۲-۵: سیگنال و پوش آن..... ۲۳
شکل ۲-۶: رابطه بین تخلخل کل و ضریب تضعیف پرتوهای گاما در اندازه‌گیری تخلخل..... ۲۴
شکل ۲-۷: طرح قرار گیری سنسور طیف سنج مادون قرمز در پشت زیر شکن..... ۲۵
شکل ۲-۸: موقعیت حسگر فراصوت نسبت به لبه شیار شخم برای هدایت تراکتور..... ۲۶
شکل ۲-۹: رابطه جذب انرژی فراصوت و رطوبت خاک ۲۹
شکل۲-۱۰: نمای جانبی چرخ به همراه مبدل و کاوشگر..... ۳۰
شکل ۲-۱۱: نمای کلی گاوآهن الکترونیکی..... ۳۱
شکل ۳-۱: نمای کلی سامانه فراصوتی..... ۳۳
شکل ۳-۲: صفحات کنترل فرستنده و گیرنده..... ۳۴
شکل ۳-۳: تراگذرهای فراصوتی..... ۳۵
شکل ۳-۴: بلوک دیاگرام دستگاه گیرنده فرستنده فراصوت خاک..... ۳۶
شکل ۳-۵: زمان بندی سیگنال..... ۳۹
شکل ۳-۶: خروجی نرم‌افزار در رایانه..... ۳۹
شکل ۳-۷: نویزهای الکترومغناطیس..... ۴۰
شکل ۳-۸ ظرف خاک درون دستگاه CBR..... ۴۵
شکل ۳-۹: نمونه فشرده شده در رطوبت بهینه تراکم و حد خمیری..... ۴۶
شکل ۳-۱۰: امواج دریافتی برای خاک لوم رسی با نیروهای مختلف..... ۴۸
شکل ۳-۱۱: خاک لوم رسی با سطوح مختلف تراکم..... ۴۸
شکل ۳-۱۲: امواج دریافتی برای خاک لوم رسی با ژل و بدون ژل..... ۴۹
شکل ۳-۱۳: امواج دریافتی بدون پوش‌گیری بدون پوش و با پوش..... ۵۰
شکل ۳-۱۴: نمونه در دستگاه نگهدارنده به همراه شاهد در بالای آن..... ۵۲
شکل ۳-۱۵: استوانه‌های فلزی قرار داده شده بر روی خاک..... ۵۲
۳-۱۶: تراگذرهای فرستنده و گیرنده در دستگاه نگهدارنده تست مزرعه‌ای..... ۵۴
شکل ۳-۱۷: دستگاه تست مزرعه‌ای..... ۵۵
شکل ۴-۱ نمودار واسنجی در فاصله‌های مختلف..... ۵۹
شکل ۴-۲: میزان تضعیف امواج در خاک لوم رسی با تخلخل کم و ولتاژ ۹۰۰V..... ۶۲
شکل ۴-۳: میزان تضعیف در خاک لوم رسی با تخلخل کم و بسامد ۷۵kHz..... ۶۳
شکل ۴-۴:میزان تضعیف در خاک لوم رسی با بسامد ۱۲۵kHz و ولتاژ تحریک ۹۰۰V..... ۶۳
شکل ۴-۵: میزان تضعیف در خاک لوم رسی با بسامد ۱۲۵kHz و ولتاژ تحریک ۱۸۰۰V..... ۶۳

شکل ۴-۶: میزان تضعیف در خاک لوم رسی با بسامد ۷۵kHz و ولتاژ تحریک ۹۰۰V ۶۴
شکل ۴-۷: میزان تضعیف در خاک لوم رسی با بسامد ۷۵kHz و ولتاژ تحریک ۱۸۰۰V ۶۴
شکل ۴-۸: میزان تضعیف در سه بافت خاک با بسامد ۷۵kHz و ولتاژ تحریک ۱۸۰۰V ۶۹
شکل ۴-۹: میزان تضعیف در خاک رسی با بسامد ۷۵kHz و ولتاژ تحریک ۱۸۰۰V ۷۰
شکل ۴-۱۰: میزان تضعیف در خاک لومی شنی با بسامد ۷۵kHz و ولتاژ تحریک ۱۸۰۰V ۷۰
شکل ۴-۱۱: میزان تضعیف در خاک لومی شنی با تخلخل متوسط و بسامد ۷۵kHz ۷۲
شکل ۴-۱۲: سرعت عبور موج در خاک لوم رسی با ولتاژ تحریک ۱۸۰۰V ۷۵
شکل ۴-۱۳: سرعت موج در خاک لوم رسی بابسامد ۷۵kHz ۷۵
شکل۴-۱۴: سرعت در خاک لوم رسی با بسامد ۱۲۵kHz و ولتاژ تحریک ۹۰۰V ۷۶
شکل ۴-۱۵: سرعت در خاک لوم رسی با بسامد ۱۲۵kHz و ولتاژ تحریک ۱۸۰۰V ۷۶
شکل ۴-۱۶: سرعت در خاک لوم رسی با بسامد ۷۵kHz و ولتاژ تحریک ۹۰۰V ۷۶
شکل ۴-۱۷: سرعت در خاک لوم رسی با بسامد ۷۵kHz و ولتاژ تحریک ۱۸۰۰V ۷۷
شکل ۴-۱۸: تغییرات سرعت موج در سه بافت خاک با بسامد ۷۵kHz و ولتاژ تحریک ۱۸۰۰V ۸۲
نمودار ۴-۱۹: سرعت در خاک رسی با بسامد ۷۵kHz و ولتاژ تحریک ۱۸۰۰V ۸۲
شکل ۴-۲۰: سرعت در خاک لوم شنی با بسامد ۷۵kHz و ولتاژ تحریک ۱۸۰۰ V ۸۲
شکل ۴-۲۱: میزان تضعیف در خاک لومی شنی با تخلخل متوسط و بسامد ۷۵kHz ۸۴

فهرست جدول‌ها

جدول۲-۱: برخی خواص انواع پرتوها..... ۱۴

جدول ۳-۱: مشخصات خاک‌های مورد مطالعه..... ۴۳

جدول ۴-۱: تجزیه واریانس میزان تضعیف برای خاک لوم رسی..... ۶۰

جدول ۴-۲: مقایسه میانگین میزان تضعیف در تخلخل‌های مختلف..... ۶۱

جدول ۴-۳: مقایسه میانگین میزان تضعیف دررطوبت‌های مختلف..... ۶۱

جدول ۴-۴: مقایسه میانگین میزان تضعیف رطوبت در تخلخل‌های مختلف خاک لوم رسی..... ۶۲

جدول ۴-۵: تجزیه واریانس میزان تضعیف موج در سه بافت خاک و ولتاژ ۹۰۰V..... ۶۵

جدول ۴-۶: مقایسه میانگین میزان تضعیف موج در سه بافت خاک و ولتاژ ۹۰۰V..... ۶۵

جدول ۴-۷: مقایسه میانگین میزان تضعیف موج در تخلخل‌های مختلف خاک و ولتاژ ۹۰۰V..... ۶۵

جدول ۴-۸: مقایسه میانگین میزان تضعیف موج دررطوبت‌های مختلف خاک و ولتاژ ۹۰۰V..... ۶۵

جدول ۴-۹: مقایسه میانگین میزان تضعیف موج در سطوح مختلف تخلخل در رطوبت تحت ولتاژ ۹۰۰V..... ۶۶

جدول ۴-۱۰: مقایسه میانگین میزان تضعیف موج در انواع بافت و سطوح تخلخل خاک تحت ولتاژ ۹۰۰V..... ۶۶

جدول ۴-۱۱: مقایسه میانگین میزان تضعیف موج در انواع بافت و سطوح رطوبت خاک تحت ولتاژ ۹۰۰V..... ۶۶

جدول ۴-۱۲: تجزیه واریانس میزان تضعیف موج در سه بافت خاک و ولتاژ ۱۸۰۰V..... ۶۷

جدول ۴-۱۳: مقایسه میانگین میزان تضعیف موج در سه بافت خاک و ولتاژ ۱۸۰۰V..... ۶۷

جدول ۴-۱۴: مقایسه میانگین میزان تضعیف موج در تخلخل‌های مختلف خاک و ولتاژ ۱۸۰۰V..... ۶۷

جدول ۴-۱۵: مقایسه میانگین میزان تضعیف موج دررطوبت‌های مختلف خاک و ولتاژ ۱۸۰۰V..... ۶۷

جدول ۴-۱۶: مقایسه میانگین میزان تضعیف موج در سطوح مختلف تخلخل در رطوبت تحت ولتاژ ۱۸۰۰V..... ۶۸

جدول ۴-۱۷: مقایسه میانگین میزان تضعیف موج در انواع بافت و سطوح تخلخل خاک تحت ولتاژ ۱۸۰۰V..... ۶۸

جدول ۴-۱۸: مقایسه میانگین میزان تضعیف موج در انواع بافت و سطوح رطوبت خاک تحت ولتاژ ۱۸۰۰V..... ۶۸

جدول ۴-۱۹: تجزیه واریانس میزان تضعیف موج فراصوت در سه بافت خاک ۷۱

جدول ۴-۲۰: مقایسه میانگین میزان تضعیف موج در سه بافت خاک و ولتاژ ۱۸۰۰V..... ۷۱

جدول ۴-۲۱: دامنه امواج دریافتی برای بافت‌های مختلف خاک mV..... ۷۲

جدول ۴-۲۲ تجزیه واریانس سرعت عبور موج فراصوت در خاک لوم رسی ۷۴

جدول ۴-۲۳: مقایسه میانگین سرعت تخلخل‌های مختلف..... ۷۴

جدول ۴-۲۴: مقایسه میانگین سرعت رطوبت‌های مختلف..... ۷۴

جدول ۴-۲۵: مقایسه میانگین سرعت رطوبت در تخلخل ۷۵

جدول ۴-۲۶ تجزیه واریانس سرعت موج در سه نوع بافت خاک در ولتاژ ۹۰۰V..... ۷۸

جدول ۴-۲۷: مقایسه میانگین سرعت موج در سه بافت خاک و ولتاژ ۹۰۰V..... ۷۸

جدول ۴-۲۸: مقایسه میانگین سرعت موج در تخلخل‌های مختلف خاک و ولتاژ ۹۰۰V..... ۷۸

جدول ۴-۲۹: مقایسه میانگین سرعت موج در رطوبت‌های مختلف خاک و ولتاژ ۹۰۰V..... ۷۸

جدول ۴-۳۰: مقایسه میانگین سرعت در سطوح مختلف تخلخل در رطوبت تحت ولتاژ ۹۰۰V..... ۷۹

جدول ۴-۳۱: مقایسه میانگین سرعت در انواع بافت و سطوح تخلخل خاک تحت ولتاژ ۹۰۰V ۷۹
جدول ۴-۳۲: مقایسه میانگین سرعت در انواع بافت و سطوح رطوبت خاک تحت ولتاژ ۹۰۰V ۷۹
جدول ۴-۳۳: تجزیه واریانس سرعت موج در سه نوع خاک در ولتاژ ۱۸۰۰V ۸۰
جدول ۴-۳۴: مقایسه میانگین سرعت موج در سه بافت خاک و ولتاژ ۱۸۰۰V ۸۰
جدول ۴-۳۵: مقایسه میانگین سرعت موج در تخلخل‌های مختلف خاک و ولتاژ ۱۸۰۰V ۸۰
جدول ۴-۳۶: مقایسه میانگین سرعت موج در رطوبت‌های مختلف خاک و ولتاژ ۱۸۰۰V ۸۰
جدول ۴-۳۷: مقایسه میانگین سرعت در سطوح مختلف تخلخل در رطوبت تحت ولتاژ ۱۸۰۰V ۸۱
جدول ۴-۳۸: مقایسه میانگین سرعت در انواع بافت و سطوح تخلخل خاک تحت ولتاژ ۱۸۰۰V ۸۱
جدول ۴-۳۹: مقایسه میانگین سرعت در انواع بافت و سطوح رطوبت خاک تحت ولتاژ ۱۸۰۰V ۸۱
جدول ۴-۴۰:تجزیه واریانس تغییرات سرعت موج در سه بافت خاک ۸۳
جدول ۴-۴۱: مقایسه میانگین سرعت موج در سه بافت خاک و ولتاژ ۱۸۰۰V ۸۳

چکیده

خصوصیات فیزیکی خاک نقش مهمی در رشد گیاه و راندمان محصول دارد. اندازه‌گیری خصوصیات فیزیکی خاک برای مدیریت و بهره‌برداری صحیح از خاک و همچنین دستیابی به عملکرد مطلوب ضروری است. رطوبت و تخلخل خاک از مهمترین عوامل فیزیکی خاک در رشد گیاه هستند. خاک با رطوبت و تخلخل مناسب، شرایط بهتری را برای رشد گیاه فراهم می‌آورد. برای پیش بینی میزان رطوبت و تخلخل خاک، روش های متعددی ارایه شده که هر کدام مزایا و معایب خاص خود را دارند. آزمون‌های غیر مخرب فراصوتی به دلیل نیاز به محیط ماده برای عبور امواج، از توانایی بالایی برای تخمین ویژگی های فیزیکی خاک برخوردار هستند. آزمون‌های فراصوتی در بسامدهای مختلف بطور متعدد در محصولات کشاورزی و بندرت در خاک استفاده شده است. در تحقیق حاضر ویژگی امواج عبوری از نمونه خاک به کمک دو تراگذر گیرنده و فرستنده در بسامدهای ۷۵kHz و ۱۲۵kHz در دو سطح ولتاژتحریک $۹۰۰V_{p-p}$ و $۱۸۰۰V_{p-p}$ مورد بررسی قرار گرفت. به منظور تخمین رطوبت و تخلخل خاک، دو متغیر سرعت عبور موج و میزان تضعیف امواج فراصوت اندازه‌گیری شد. نمونه‌های خاک در سه سطح تخلخل ۵۵٪، ۴۷٪ و ۴۰٪ برای سه نوع خاک رسی، لوم رسی و لوم شنی در سطوح مختلف رطوبت تهیه شدند. رطوبت خاک بر اساس وزن خشک برای هر سه نوع خاک از بالای حدخمیری انتخاب شد و تا زمانی که تغییرات رطوبت وزنی در آون ثابت ماند، ادامه یافت. این تغییرات برای خاک رسی از ۳۰٪ وزنی تا ۱۲٪ وزنی، برای خاک لوم رسی از ۲۴/۵٪ وزنی تا ۷٪ وزنی و برای خاک لوم شنی از ۱۹٪ وزنی تا ۶٪ وزنی بود. نمونه‌های استوانه ای خاک با قطر ۶۹ و ضخامت ۲ میلی‌متر تهیه شدند. استوانه خاک در یک دستگاه نگهدارنده ثابت نگه داده شد و دو طرف آن تراگذرهای گیرنده فرستنده قرار گرفتند. نمونه خاک به همراه تراگذر در آون در دمای ۵۵ درجه سانتی‌گراد قرار داده شد و هر ۱۵ دقیقه یکبار سرعت عبور موج و میزان تضعیف امواج فراصوت اندازه گیری و نمونه شاهد توزین گردید. برای بهتر مشخص شدن اثر بافت خاک، از نمونه‌هایی به ضخامت ۴۰میلی‌متر و کاملاً خشک در سطح تخلخل ۴۰٪ استفاده شد. نتایج تجزیه واریانس در قالب طرح کامل تصادفی، تفاوت معنی‌داری را بین بافت، تخلخل و رطوبت خاک برای هر دو متغیر سرعت و میزان تضعیف امواج فراصوت نشان داد. بسامد ۷۵kHz و ۱۲۵kHz نیز اثر معنی‌داری بر سرعت و میزان تضعیف امواج فراصوت داشت، اما سطوح مختلف ولتاژ فقط بر میزان تضعیف امواج تاثیر داشت. میزان تضعیف امواج در هر دو سطح بسامد و ولتاژ برای همه سطوح تخلخل و رطوبت خاک، با شنی تر شدن خاک افزایش یافت. همچنین میزان تضعیف با افزایش تخلخل خاک افزایش یافت. تغییرات میزان تضعیف موج با تغییرات رطوبت در تمام بافت های خاک و تخلخل، رابطه‌ی مستقیم داشت و با افزایش رطوبت افزایش یافت. همچنین در هر دو بسامد و هر دو سطح ولتاژ اعمالی، سرعت عبور موج برخلاف میزان تضعیف موج، با شنی تر شدن خاک کاهش یافت. رابطه عکس با تخلخل و رطوبت خاک داشت، به عبارت دیگر افزایش تخلخل و رطوبت خاک موجب کاهش سرعت عبور موج شد. امواج دریافتی در بسامد ۷۵kHz از یکنواختی و پایداری بهتری نسبت به بسامد ۱۲۵kHz برخوردار بود. میزان تضعیف امواج در بسامد ۷۵kHz کمتر بود. دامنه دریافتی در ولتاژ تحریک ۱۸۰۰Vp-p بهتر از ولتاژ تحریک ۹۰۰Vp-p بود. ولتاژ تحریک بر میزان تضعیف دامنه موج فراصوت اثر داشت، اما بر سرعت موج فراصوت اثر چندانی نداشت. هر سه فاکتور بافت، تخلخل و رطوبت خاک اثر معنی‌داری بر میزان تضعیف و سرعت موج داشت، اما سرعت موج بهتر از میزان تضعیف تغییرات این سه فاکتور را نشان داد.

واژه‌های کلیدی: امواج فراصوت، بافت خاک، رطوبت،تخلخل

فصل اول

مقدمه

۱-۱ مقدمه

خاک و آب دو منبع اصلی کشاورزی هستند. بهره برداری مطلوب و صحیح از این دو منبع خدادادی بصورت پایدار برای همه‌ی نسل‌ها یکی از مهمترین وظایف حیاتی عصر ماست. خاک باید محیطی مناسب برای رشد گیاه باشد و آب و مواد غذایی کافی برای رشد و تغذیه گیاه ذخیره نماید [۲۹]. در این رابطه خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مهم هستند. خاک با رطوبت و تخلخل مناسب، شرایط بهتری را برای رشد گیاه فراهم می‌آورد. گیاهان برای تغذیه، نیازمند آب (مواد غذایی به صورت محلول جذب گیاه می‌شود) و همچنین برای تنفس نیازمند هوا هستند. اگر خاک دارای تخلخل کمی باشد، علاوه بر اینکه مانع جدی برای رشد و توسعه ریشه گیاه می‌باشد، تهویه مطلوب نبوده و اکسیژن مورد نیاز گیاه نیز به خوبی تامین نمی شود. خصوصیات مزبور نه تنها در سطح خاک، بلکه در عمق و در طول زمان نیز دچار تغییر می‌گردد. چگونگی این تغییرات را می‌توان در حاصلخیزی خاک، محتوای و بافت خاک جستجو کرد [۹]. رطوبت و تخلخل تغییر پذیری وسیع و سریعی با زمان دارند، لذا اندازه‌گیری رطوبت و تخلخل خاک در شرایط مختلف زمانی و مکانی برای مدیریت صحیح خاک ضروری می‌باشد. با توسعه

آزمون‌های غیر مخرب می‌توان امیدوار بود که تغییرات رطوبت خاک مزرعه به صورت بلادرنگ[۱] اندازه‌گیری شود. آزمون هایی غیر مخرب هستند که اثرات تخریبی بر روی نمونه نداشته باشند. به عبارت دیگر آزمون‌هایی غیر مخرب هستند که اثرات مخرب فتوفیزیکی، حرارتی، شیمیایی، مکانیکی و فتوشیمیایی بر روی نمونه نداشته باشند [۱۱]. آزمون‌های صوتی و فراصوتی[۲] یکی از آزمون های غیر مخرب هستند که قادرند خصوصیات فیزیکی خاک را اندازه‌گیری کنند. صوت و فراصوت از انواع امواج مکانیکی هستند. امواج مکانیکی در طول انتشار خود ذرات محیط را از تعادل خارج ساخته و مرتعش می‌کنند. بنابراین امواج صوتی به محیطی که از آن عبور می‌کنند وابسته هستند و با تغییر در شرایط محیط، خصوصیت امواج عبوری نیز تغییر می کند. [۱۹] انتشار امواج صوتی در محیط های دانه ای تحکیم نیافته[۳] مانند خاک تابعی از تخلخل (تراکم) و محتوای رطوبت آن می‌باشد [۱۴]. از جمله خصوصیات امواج صوتی سرعت کم آن می‌باشد. برای مثال، سرعت امواج الکترومغناطیس در هوا تقریباً $۳\times۱۰^{۸}\mathrm{m/s}$ می باشد، در حالی که سرعت امواج صوتی تقریباً $۳۳۰\mathrm{m/s}$ می‌باشد و تحت شرایط مختلف دما و فشار کمی تغییر می‌کند. به عبارت دیگر امواج صوتی برای عبور از یک ماده نیاز به زمان بیشتری دارند، بنابراین می‌توانند اطلاعات کامل‌تری از ویژگی های خاک در اختیار ما قرار دهند. از آنجا که تغییرات تخلخل و رطوبت خاک منجر به تغییرات فیزیکی محیط (مخصوصاً خواص کشسانی و چگالی خاک که اثرگذار بر روی امواج می‌باشد) می‌شود، این تغییرات بر روی خصوصیت امواج عبوری صوت و فراصوت نیز تاثیر می گذارند. با واسنجی این تغییرات می توان میزان رطوبت و تخلخل خاک را پیش بینی نمود.

۱-۲ اهداف تحقیق

هدف پژوهش حاضر، پیش بینی رطوبت و تخلخل خاک به کمک امواج فراصوتی بود و به طور کلی می‌توان اهداف تحقیق حاضر را به شرح زیر بیان نمود:

الف- انتخاب روش مناسب برای بکارگیری امواج فراصوت در خاک.

ب- تعیین بسامد[۴] و دامنه مناسب برای تخمین رطوبت و تخلخل خاک.

ج- تعیین اثر نوع بافت، رطوبت و تخلخل خاک بر دامنه و سرعت امواج فراصوتی.

---

۱ - Online
۲ - Ultrasonic
۳ - Unconsolidated granular medium
٤ - Frequency

فصل دوم

کلیات و مروری بر مطالعات گذشته

۲-۱ خاک

خاک سیستمی ناهمگن، چند فازی، ذره‌ای و متخلخل است. سه فاز متعارف در خاک دیده می‌شود. فاز جامد ماتریس خاک را تشکیل می‌دهد؛ فاز مایع شامل آب خاک، که بهتر است محلول خاک نامیده شود؛ و فاز گازی که هوای خاک را شامل می شود. فاز جامد خاک از ذراتی تشکیل شده که از لحاظ ترکیب شیمیایی و کانی شناسی و نیز اندازه و منشا بوجود آمدن متفاوت‌اند. فاز جامد خاک همچنین دارای مواد آلی است که به دانه‌های معدنی چسبیده‌اند و اغلب آن ها را به هم متصل می‌کنند تا خاکدانه تشکیل شود. شیوه‌ی سازمان یابی اجزای جامد خاک، خصوصیات هندسی فضاهای خالی را تعیین می‌کند که در آن محلول خاک جریان می‌یابد و هوا باقی می‌ماند [۲۹]. بافت خاک از ویژگی های فاز جامد خاک می‌باشد، که نسبتا پایدار بوده و تغییر پذیری کمی با زمان دارد. اما آب خاک یا همان رطوبت خاک و حجم هوای خاک تغییر پذیری وسیع و سریعی با زمان دارند[۹]. رطوبت و هوای خاک، فضاهای خالی (غیر از فاز جامد خاک) را اشغال می‌کنند و هر قدر فضاهای خالی بیشتر از آب پر شده باشد، فضای کمتری برای هوا باقی می‌ماند.

۲-۲ تخلخل[۱]

تخلخل شامل حفره هایی است که توسط بخش جامد خاک اشغال نشده‌اند[۹]. تخلخل به دو قسمت حقیقی[۲] و باقیمانده[۳] تقسیم می شود. تخلخل باقیمانده به آن قسمت از حفره که از فضاهای بسته کوچک تشکیل شده و راهی به شبکه خلل و فرج یا خارج (هوای جو)ندارند اطلاق می شود . تخلخل حقیقی به آن قسمت از تخلخل اطلاق می شود که با خارج (هوای جو)در ارتباط باشند [۹]. تخلخل حقیقی خود به دو دسته درشت و ریز تقسیم می‌گردد. تخلخل درشت یا تخلخل موثر[۴] به آن قسمت از فضای خالی اطلاق می‌شود که در آن پدیده‌های انتقال آب و هوا به راحتی صورت می‌گیرد. تخلخل ریز یا تخلخل موئینه‌ای[۵] به آن قسمت از سیستم فضای خاک گفته می‌شود که در آن حفره‌های بسیار ریز مانع جریان ثقلی آب می‌گردند. معمولا قطر ظاهری ۶۰-۳۰ میکرومتر برای حد فاصل تخلخل ریز و درشت پذیرفته شده است [۹]. البته دسته‌بندی دیگری نیز وجود دارد که خلل و فرج را به دو قسمت تخلخل بافتی[۶] و تخلخل ساختمانی[۷] تقسیم بندی می‌کند. تخلخل بافتی یا تخلخل داخل خاکدانه‌ای[۸] با توزیع اجزای اولیه خاک (شن، سیلت و رس) تعیین می‌شود و نسبتا پایدار است. از طرف دیگر تخلخل ساختمانی یا بین خاکدانه‌ای[۹] با موقعیت، جهت و شکل خاکدانه‌ها نسبت به یکدیگر مشخص می‌شود و پایداری کمی دارد [۳۴].

خلل و فرج خاک با اندازه، شکل و پیوستگی متفاوت به وسیله عامل‌های غیر زنده[۱۰] مانند خاک‌ورزی، عبور و مرور ماشینها در مزرعه، یخ زدگی و گرم شدن خاک، خشک و تر شدن متوالی و عواملی نظیر ریشه گیاه و حرکت کرم خاکی ایجاد می‌شود. خلل و فرج خاک در کوتاه مدت تحت تاثیر عوامل انسانی مانند شخم و عبور و مرور و... و در میان مدت تحت تاثیر عواملی چون شخم مدوام در عمق یکسان (ایجاد لایه سخت) و فعالیت موجودات زنده خاک خصوصاً کرم خاکی می‌باشد. تغییرات بلند مدت در خصوصیات خاک نیز بخاطر تغییر در توزیع مواد آلی می‌تواند باشد [۳۱]. خلل و فرج خاک مقدار هوا و آب در دسترس گیاهان، تهویه هوا ی خاک و... را تحت تاثیر قرار می‌دهد. گیاهان برای رشد و پرورش خود در هر مقطع از رشد نیازهای خاصی دارند، ولی در همه‌ی مراحل باید آب و هوای کافی در

۱- Porosity
۲ - Effective
۳ - Residual
٤ - Efficient
٥ - Capillary
٦ - Textural
۷ - Structural
۸ - Intra aggregate
۹ - Inter aggregate
۱۰ - Abiotic

اختیار آن ها قرار گیرد. مقدار هوای در دسترس گیاهان از یک طرف به خلل و فرج و از طرف دیگر به مقدار رطوبت خاک بستگی دارد. هوای خاک فضای آزاد شده از رطوبت را اشغال می‌کنند [۹]. رشد ریشه گیاهان و میکروارگانیسم‌های خاک موجب مصرف اکسیژن و تولید دی اکسیدکربن می شود [۹]. حداقل میزان خلل و فرج خاک باید به گونه‌ای باشد که هوای خاک بتواند با جو ارتباط داشته باشد، و رشد و فعالیت ریشه و میکرو ارگانیسم‌های خاک تضمین شود. به عبارت دیگر توسعه ریشه گیاه تا عمقی رشد می‌کند که خلل و فرج درشت هنوز قادر به تهویه‌ی هوای خاک باشند. البته باید در نظر داشت که ذخیره و در دسترس بودن هوا و رطوبت خاک فقط به تخلخل کل خاک بستگی نداشته بلکه مهم تر از آن به چگونگی و توزیع خلل و فرج وابسته است [۱]. نرخ نفوذ آب نیز بوسیله توزیع اندازه و پیوستگی خلل و فرج خاک کنترل می‌شود [۳۷]. جسمی که دارای تعداد بیشماری فضای کوچک و تخلخل زیاد باشد، هدایت آب در حالت اشباع آن کمتر از هدایت آبی جسمی است که تخلخل کمتر و فضاهای بزرگتری دارد[۷]. تخلخل با تراکم خاک رابطه‌ی معکوس دارد که در قسمت‌های بعدی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲-۳ اندازه گیری تخلخل خاک

اندازه گیری تخلخل خاک به دو روش مستقیم و غیر مستقیم انجام می‌شود.

۲-۳-۱ روش مستقیم

اندازه‌گیری تخلخل کل بر روی یک نمونه خاک دست نخورده صورت می‌پذیرد. یعنی نمونه‌ای که ساختمان آن (آرایش ذرات آن) تغییری نکرده باشد. حفظ ساختمان خاک در هنگام نمونه برداری بسیار مشکل است. در روش مستقیم، چگالی حقیقی و چگالی ظاهری خاک تعیین شده واز رابطه‌ی (۲-۱) مقدار تخلخل بدست می‌آید [۹].

$$f = 100 \times (1 - \frac{\rho_b}{\rho_s}) \qquad (۲-۱)$$

که در آن ρ_b چگالی ظاهری و ρ_s چگالی حقیقی می‌باشد.

الف) تعیین چگالی ظاهری با چگالی سنج غشایی

با چگالی سنج غشایی می‌توان حجم کل ظاهری یک نمونه خاک را تعیین نمود. ابتدا نمونه خاک را برداشته (در اثر برداشت نمونه یک حفره در خاک ایجاد می‌شود.) و سپس یک استوانه پر از آب که بالا و پایین آن دارای پوشش لاستیکی می‌باشد بر روی حفره‌ی ایجاد شده در هنگام نمونه برداری قرار می‌گیرد. با برقراری ورود هوا از قسمت بالای استوانه فشار بر روی سطح آب افزایش یافته و حجم آب به

اندازه‌ی حجم حفره کم می‌شود. بدین ترتیب کاهش حجم آب، حجم کل نمونه برداشت شده را نشان می‌دهد. با تعیین جرم قسمت جامد خاک (خاک کاملاً خشک) چگالی ظاهری از رابطه ی (۲-۲) بدست می‌آید [۹].

$$\rho_b = \frac{M_s}{V_t} \qquad (۲-۲)$$

که در آن M_s وزن خاک خشک و V_t حجم کل خاک می‌باشد.

ب) روش استوانه ای

یک استوانه‌ی فلزی با حجم معین که یک طرف آن تیز شده، با نیروی مکانیکی داخل خاک فرو برده می‌شود و سپس با کندن خاک اطراف آن خارج می‌گردد. نمونه خاک داخل استوانه به آزمایشگاه منتقل می‌شود. با داشتن حجم استوانه و جرم خاک خشک چگالی ظاهری طبق رابطه (۲-۲) به دست می‌آید. عیب مهم این روش آن است که فرو کردن استوانه در خاک علاوه بر مشکل بودن، موجب فشردگی خاک می شود و تخلخل تغییر می‌کند [۹]..

ج) تعیین چگالی حقیقی با پیکنومتر آبی

برای اندازه‌گیری چگالی حقیقی از روش پیکنومتر آبی استفاده می‌کنند. در این روش با حل کردن خاک خشک در آب خلل و فرج خاک از بین رفته و حجم حقیقی خاک در نتیجه چگالی حقیقی خاک بدست می‌آید.چگالی حقیقی از رابطه‌ی (۲-۳) محاسبه می‌گردد [۹].

$$\rho_s = \frac{\rho_w \times (M_2 - M_1)}{[(M_4 - M_3) - (M_1 - M_1)]} \qquad (۲-۳)$$

M_1: جرم کل ظرف حاوی نمونه و آب

M_2: جرم ظرف حاوی نمونه بدون آب

M_3: جرم ظرف

M_4: جرم ظرف پر از آب بدون نمونه

ρ_w: چگالی آب

مهمترین عیب این روش وقت‌گیر و سخت بودن مراحل انجام آزمایش است. همچنین باید چگالی ظاهری و چگالی حقیقی تعیین شود و سپس به طور غیر مستقیم درصد تخلخل را محاسبه کرد.

۲-۳-۲ روش غیر مستقیم

در این روش اندازه‌گیری تخلخل با تعیین چگونگی توزیع قطر خلل و فرج از طریق برقراری یک منحنی تخلخل صورت می‌پذیرد. این منحنی مشابه منحنی دانه سنجی بوده و به کمک یک تخلخل سنج[۱] محتوی جیوه تهیه می‌گردد. تخلخل را می‌توان به کمک یک پیکنومتر هوا[۲] (تخلخل سنج بوریه[۳] یا لوبل[۴]) با تعیین مقدار خلل و فرج کل اندازه‌گیری نمود [۹].

الف) تخلخل سنج جیوه‌ای

با تخلخل سنج جیوه‌ای می‌توان جیوه را با فشار در خلل و فرج یک نمونه خاک تزریق نمود. این تزریق با پر نمودن خلل و فرج درشت شروع شده و به تدریج که قطر فضاهای خالی کمتر می‌شود عمل تزریق مستلزم اعمال فشار بیشتری می‌باشد. بدین ترتیب توزیع اندازه خلل و فرج نمونه از مقادیر تزریق شده در فشارهای مختلف منتج می‌گردد (هر چقدر قطر خلل و فرج کمتر باشد مستلزم اعمال فشار بیشتری است.) [۹].

ب) پیکنومتر هوا

پیکنومتر هوا از دو لوله‌ی شیشه‌ای تشکیل شده که به وسیله‌ی یک لوله نازک قابل ارتجاع به هم مربوطند. این مجموعه از یک طرف به ظرف مسدود راه دارد. در این ظرف یک نمونه خاک یا هر چیز دیگر با حجم معین قرار دارد. در طرف دیگر آن دو لوله متصل بهم که درون آن تا سطح معینی جیوه پر شده قرار دارد. مقدار معینی جیوه از طریق لوله‌ی آزاد تزریق می‌گردد، این عمل موجب تراکم هوای موجود در ظرف مسدود و نمونه خاک می‌شود. برای ایجاد تعادل بین این تراکم و فشار اتمسفر، اختلاف ارتفاع معینی بین سطوح جیوه در دو شاخه‌ی دستگاه برقرار می‌گردد. از واسنجی این اختلاف ارتفاع، می‌توان تخلخل خاک را پیش بینی نمود. علاوه بر طولانی بودن زمان اندازه‌گیری، تهیه‌ی خاک دست نخورده و حمل آن به آزمایشگاه نیز دشوار و همراه با خطای زیادی می باشد [۹].

۲-۴ تراکم خاک

تراکم خاک به فرآیندی گفته می‌شود که فضاهای خالی خاک کاهش یافته و در تماس بیشتری

---

۱ - Prosimeter
۲ - Pycnometer
۳ -Bouvier
٤ -Lobell

نسبت به هم قرار گیرند. بنابراین چگالی خاک افزایش می‌یابد [۱۵]. از جمله عواملی که موجب تشدید تراکم مصنوعی خاک می‌شوند می‌توان به عبور و مرور ماشین‌های کشاورزی، دوره تناوب کوتاه و مدیریت ناصحیح خاک (کمبود مواد آلی و خاک ورزی در شرایط رطوبت زیاد) نام برد. تراکم طبیعی خاک در محدوده‌ی وسیعی از خاک در شرایط آب و هوایی مختلف اتفاق می‌افتد. تراکم خاک با افزایش مقاومت خاک و کاهش حاصلخیزی آن به لحاظ کاهش ذخیره آب و مواد غذایی همراه است [۲۸]. تراکم خاک موجب کاهش مواد آلی، کاهش چرخه تغذیه و معدنی شدن، کاهش فعالیت میکروارگانیسم‌ها [۲۸] و کاهش رشد ریشه به دلیل تغییرات قابل ملاحظه در اطراف و زیر آن [۵۷] و در نتیجه کاهش رشد گیاه و عملکرد محصول می شود. افزایش رطوبت خاک موجب کاهش شدید ظرفیت باربری خاک می‌شود [۲۸]، در چنین شرایطی (رطوبت زیاد) عملیات شخم نیز می‌تواند به بدتر شدن تراکم خاک منجر شود. میزان تراکم حاصل از عبور و مرور ماشین‌های کشاورزی بستگی به مقاومت مکانیکی خاک، خصوصیات فیزیکی خاک (بافت خاک و درصد ماده آلی)، ساختار لایه شخم خورده در زیر چرخ و میزان بار وارده دارد [۲۸]. البته عواملی چون خصوصیات ذاتی خاک، انقباض و انبساط خاک و آبیاری سطحی نیز در تراکم خاک موثر هستند [۲]، اما تاثیرآنها خیلی کمتر از تاثیر رطوبت و تردد ماشین‌های کشاروزی می‌باشد.

تراکم خاک را می‌توان به وسیله محدوده وسیعی از خصوصیات فیزیکی خاک مانند چگالی ظاهری، تخلخل، نسبت پوکی[۱] و توزیع اندازه خلل و فرج[۲] به طور مستقیم اندازه‌گیری کرد [۵۷]. همچنین از روش‌های غیر مستقیم مانند اندازه‌گیری افزایش مقاومت مکانیکی خاک استفاده کرد. این روش شامل تعیین مقاومت به فرو رفتن یک مخروط فلزی و نفوذ پذیری هوا یا آب در خاک می‌باشد [۲]. در تعیین تراکم با روش‌های غیر مستقیم باید همواره این نکته را مد نظر قرار داشت که ممکن است تغییرات در شرایط خاک مانند افزایش چگالی به درستی تفسیر نشود، برای مثال افزایش مقاومت به نفوذ مخروط ممکن است در اثر تغییر در محتوی رطوبتی و تغییرات ساختار پیوندی خاک دانه‌ها حاصل شود. در حالی که حجم منافذ در خاک متراکم تغییر نکرده باشد [۲].

۲-۵ رطوبت خاک

رطوبت نقش مهمی در رفتار خاک دارد، اما اندازه گیری رطوبت با دقت و سرعت کافی با مشکلات متعددی همراه است. همچنین تغییرات مکانی و زمانی خاک، بر پیچیدگی بیشتر آن می‌افزاید

---

۱ - Void ratio
۲ - Pore size distribution

[۳۵]. رطوبت خاک اتصال حیاتی به چرخه آب دارد که از یک طرف به وسیله بارندگی و یا آبیاری و از طرف دیگر به آب زیرزمینی ارتباط دارد، که بر میزان مصرف آب تاثیرگذار است [۵۸]. همچنین آب اولین محدویت در تولید محصولات کشاورزی مناطق نیمه خشک نظیر ایران محسوب می‌شود. تقریباً ۴۰ درصد (۶۰۰ میلیون هکتار) از زمین‌های کشاورزی جهان دارای بارندگی کم یا غیر قابل پیش بینی هستند [۲۷]. علاوه بر این رطوبت خاک در رشد و عملکرد گیاهان تاثیر می‌گذارد. گیاهان برای جذب مواد غذایی و رشد خود نیاز به آب دارند که این نیاز را از رطوبت خاک برآورده می‌کنند. نواک (۱۹۹۴) در مطالعات خود به این نتیجه رسید که نرخ استخراج آب توسط ریشه گیاهان چند ساله بستگی به رطوبت خاک، نرخ تعرق و خصوصیات ریشه دارد. بسیاری از خصوصیات خاک مانند استحکام[۱]،شکل پذیری[۲]، مقاومت[۳]، تراکم‌پذیری[۴]، نفوذپذیری[۵] و قابلیت تردد[۶] روی خاک به رطوبت خاک بستگی دارد [۸]. رطوبت خاک همچنین تاثیر مستقیم بر روی خصوصیات فیزیکی مکانیکی خاک [۱۶] و نیز توزیع اندازه خاکدانه‌ها در انجام عملیات زراعی دارد [۱۷].

۲-۶ اندازه‌گیری رطوبت خاک

اندازه‌گیری رطوبت خاک به دو روش مستقیم و غیر مستقیم تقسیم بندی می‌شود:

۲-۶-۱ روش مستقیم

در این روش مقادیر حجمی یا جرمی رطوبت خاک به طور مشخص اندازه‌گیری می‌شود. اندازه‌گیری رطوبت به روش وزنی[۷] روش مستقیمی است که در مزرعه نمونه‌ای را با مته برداشت نموده و پس از توزین آن را به مدت ۲۴ ساعت در گرمخانه‌ای که دمای آن ۱۰۵ درجه‌ی سانتی‌گراد است قرار داده تا خشک شود. رطوبت جرمی از رابطه‌ی (۲-۴) تعیین می شوید [۸].

$$\%w = 100 \times \frac{W_1 - W_2}{W_2} \qquad (۴-۲)$$

که در آن W_1 وزن خاک تر و W_2 وزن خاک خشک می‌باشد.

چون اندازه‌گیری حجم نمونه خاک مشکل است رطوبت جرمی خاک اندازه‌گیری و سپس با

---

۱ - Consistency
۲ - Plasticity
۳ - Strength
٤ - Compactibility
٥ - Penetrability
٦ - Trafficability
۷ - Thermo gravimetric method

استفاده از چگالی ظاهری خاک، رطوبت جرمی به رطوبت حجمی تبدیل می گردد [۸]. بعضی از رس‌ها حتی در ۱۰۵ درجه‌ی سانتی گراد نیز مقدار قابل ملاحظه‌ای آب در خود نگه می دارند و در این درجه حرارت ممکن است مقداری از ماده‌ی آلی خاک اکسید و تجزیه شده و کاهش وزن خاک و رطوبت تنها به واسطه‌ی تبخیر رطوبت خاک نباشد [۷]. از عیب دیگر این روش عدم تکرار اندازه‌گیری به واسطه‌ی از بین رفتن نمونه می‌باشد و صرف ۲۴ ساعت این روش را طولانی نموده است.

۲-۶-۲ روش غیر مستقیم

در روش غیر مستقیم ابتدا یک عامل دیگر که درصد رطوبت بر آن موثر است اندازه‌گیری می‌شود و سپس مقدار رطوبت خاک تخمین زده می‌شود. به عبارت دیگر آن عامل، برحسب رطوبت واسنجی می‌شود. روش‌های غیر مستقیم عبارتند از روش نوترون متر، روش تابش گاما، روش انعکاس سنجی زمانی و روش قالب (بلوک) گچی [۸].

الف) روش نوترون متر

این دستگاه از چشمه‌ی نوترون تشکیل شده که نوترون را با سرعت زیاد (۱۶۰۰کیلومتر بر ثانیه) بداخل خاک گسیل می‌کند. سرعت این نوترون‌ها در برخورد با اتم‌های هیدروژن بسیار سریع‌تر از بقیه اتم‌ها کند می‌شوند. نوترون‌های کند شده در اطراف پروب به طور یکنواخت پراکنده شده و توسط یک سلول گیرنده[۱] ثبت می‌شوند. سلول گیرنده تپ[۲] الکتریکی با جذب نوترون ارسال می‌کند. تعداد تپ‌های ثبت شده در یک دوره‌ی زمانی (مثلا یک دقیقه) با تعداد نوترون‌های کند شده و در نتیجه با رطوبت حجمی خاک نسبت مستقیم دارد [۸].

ب) روش تابش گاما

در این روش اشعه گاما از یک طرف نمونه خاک فرستاده شده و از طرف دیگر دریافت می‌شود. شدت تابش دریافتی پس از عبور از خاک کاسته می‌شود که این کاهش شدت تابش بستگی به رطوبت و چگالی ظاهری خاک و فاصله‌ی تابش (ضخامت نمونه خاک که تابش از آن عبور کرده) دارد [۸].

ج) روش انعکاس سنجی زمانی[۳]

در این روش از خاصیت دی‌الکتریک آب برای تخمین مقدار حجمی آب موجود در خاک

---

۱ - Detector cell
۲ - Pulse
۳ - Time domain reflectometery

استفاده می شود. ثابت دی‌الکتریک هوا تقریباً برابر ۱ وثابت دی‌الکتریک اجزای جامد خاک بین ۲ تا ۷ و ثابت دی‌الکتریک آب حدودا ۸۰ می‌باشد. بنابراین ثابت دی‌الکتریک خاک معیار خوبی برای مقدار آب موجود در آن می‌باشد. در این روش، زمان حرکت یک میله موج بر[۱] با طول مشخص اندازه‌گیری می‌شود. سرعت موج در ارتباط با ثابت دی‌الکتریک محیط بوده و از روی آن رطوبت خاک بدست می‌آید [۸].

د) اندازه‌گیری رطوبت با بلوک گچی[۲]

قالب‌های گچی در رطوبت‌های مختلف مقاومت‌های مختلفی از خود نشان می‌دهد. با رسم منحنی تغییرات مقاومت بر حسب درصد خاک، می‌توان این قالب‌ها را واسنجی کرد. مهم‌ترین مزیت قالب‌های گچی علاوه بر سرعت اندازه‌گیری، درجه دقت آنها در رطوبت‌های کم است. علاوه بر این قالب‌های گچی ارزان بوده و می‌توان تعداد زیادی از آن‌ها را با هزینه‌ی کم در داخل خاک نصب کرد. بزرگترین مشکل در استفاده از بلوک‌های گچی حساسیت آن‌ها به شوری محلول خاک است. وجود نمک در آب موجب می‌شود که هدایت الکتریکی بلوک افزایش یافته و این امر موجب اشتباه در تخمین رطوبت می‌گردد [۸].

۲-۷ آزمون‌های غیر مخرب

آزمون‌های ارزیابی به دو صورت مخرب و غیر مخرب دسته بندی می شوند. در آزمون‌های مخرب ساختار ماده بعد از آزمون تخریب می‌شود و دیگر نمی‌توان آن را مورد ارزیابی قرار داد. آزمون‌هایی غیرمخرب محسوب می‌شوند که اثرات مخرب فتوفیزیکی، حرارتی، شیمیایی، مکانیکی و فتوشیمیایی بر روی نمونه نداشته باشند. روش‌های متعددی برای آزمون‌های غیرمخرب ابداع شده‌اند که تنها برخی از آن‌ها توانسته اند از لحاظ فنی و صنعتی توجیه داشته باشند[۱۱]. روش‌های نوری[۳]، مکانیکی، پرتو ایکس(X)[۴]، مادون قرمز(IR)، طیف سنجی رامان[۵] ، تشدید مغناطیس هسته‌ای(NMR)[۶]، نوترون، پرتوγ، پرتو β و... از جمله آزمون‌های غیرمخرب می‌باشد [۴]. در این بین امواج فراصوت یکی از امواج مکانیکی بوده که در آزمون‌های غیر مخرب مورد استفاده قرار می‌گیرد.

---

۱ - Waveguide
۲ - Gypsum block
۳ - Optic
۴ - X-Ray
۵ - Raman spectroscopy
۶ -Near magnetic resonance