

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی برق و رباتیک
رشته برق گرایش الکترونیک دیجیتال
پایان نامه کارشناسی ارشد

سنجش رطوبت خاک با استفاده از مدار مجتمع AD7745_7746

نگارنده: منیره مومنی

استاد راهنما:

دکتر ساسان ناصح

بهمن ۱۳۹۴

تقدیم به

پدر و مادر عزیزم

و خانواده مهربانم

مشکر و قدردانی

استاد گرامیه، جناب آقای دکتر ناصح

آنچه از این جان می آید این است که از صمیم قلب از همکاری صادقانه و کوشش خالصانه می

شمار راستای هدایت و راهنمایی اینجانب تقدیر و تشکر نمایم و صمیمانه ترین سپاس های خود را به شما که شمع

وجود کراتقدر خویش را در طبق اخلاص نهاده و نهال نوپای امروز را به امید فردایی سگوفاتر با عصاره می

جان آبیاری می نماید نثار کنم. امید است پیوسته سربلند و پیروز باشید.

تعهد نامه

اینجانب **منیره مومنی** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته **الکترونیک-دیجیتال** دانشکده برق و رباتیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه سنجش رطوبت خاک با استفاده از مدار مجتمع AD7745_7746 تحت راهنمایی دکتر ساسان **ناصرمتعهد** می شوم :

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید .
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود .
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده

هدف از این پژوهش، طراحی و ساخت یک سیستم جهت اندازه‌گیری رطوبت خاک است. بدین منظور یک روش اندازه‌گیری رطوبت خاک بر مبنای تغییر دی‌الکتریک خاک با تغییر رطوبت موجود در آن ارائه شده است. ابزار اندازه‌گیری از دو بخش مدار الکترونیکی و حسگر خازنی تشکیل شده است. حسگر خازنی دارای دو میله فلزی است که نقش دو جوشن یک خازن را دارند. حسگر خازنی در داخل خاک قرار می‌گیرد، و خاک نقش دی‌الکتریک این خازن را دارد. بخش الکترونیکی شامل مدار مجتمع AD7746 و ریزواپایش گر ATmega16L می‌باشد. با تغییر رطوبت خاک ظرفیت خازن تغییر کرده که به وسیله AD7746 اندازه‌گیری می‌شود. ظرفیت خازنی اندازه‌گیری شده توسط AD7746 به صورت یک داده ۲۴ بیتی نمایش داده می‌شود. کنترل AD7746 و پردازش داده‌های خروجی آن به وسیله ریزواپایش گر ATmega16L انجام گرفت. با نرم‌افزار Codevision برنامه‌ریزی گردید. نتایج حاصل از اندازه‌گیری روی یک نمایشگر LCD نمایش داده شد. با پایش ظرفیت این خازن می‌توان اندازه رطوبت خاک را برآورد نمود.

کلمات کلیدی: رطوبت خاک، AD7746، ATmega16L، دی‌الکتریک خازن.

لیست مقالات پذیرفته شده:

منیره مومنی، ساسان ناصح، (۱۳۹۴) "اندازه‌گیری رطوبت خاک با استفاده از مدار مجتمع AD7746"
" سومین کنفرانس ملی و اولین کنفرانس بین‌المللی پژوهش‌های کاربردی در مهندسی برق، مکانیک و
مکاترونیک، تهران.

فهرست مطالب

۱	فصل اول: مقدمه.....
۲	۱-۱ پیشگفتار.....
۳	۲-۱ رطوبت خاک.....
۴	۳-۱ مروری بر پایان نامه.....
۷	۲ فصل دوم: مروری بر کارهای گذشته.....
۸	۱-۲ پیشگفتار.....
۸	۲-۲ روش‌های اندازه‌گیری رطوبت.....
۸	۱-۲-۲ روش‌های اندازه‌گیری مستقیم رطوبت خاک.....
۱۰	۲-۲-۲ روش‌های اندازه‌گیری غیرمستقیم رطوبت خاک.....
۱۰	۱-۲-۲-۲ روش پراکندگی نوترونی.....
۱۲	۲-۲-۲-۲ روش میرایی پرتو گاما.....
۱۳	۳-۲-۲-۲ روش‌های دی‌الکتریک.....
۱۳	۱-۳-۲-۲-۲ روش TDR.....
۱۵	۲-۲-۲-۲-۲ روش TDT.....
۱۶	۳-۲-۲-۲-۲ روش خازنی و FDR.....
۱۸	۴-۲-۲-۲ روش DPHP.....
۱۹	۵-۲-۲-۲ روش مقاومتی.....
۲۰	۶-۲-۲-۲ روش بلوک گچی.....
۲۱	۷-۲-۲-۲ روش تانسومتر.....
۲۳	۸-۲-۲-۲ روش سنجش از راه دور.....

۲۵	.....۹-۲-۲-۲ روش نوری
۲۷	..... ۳ فصل سوم: مبانی نظری و عملی
۲۸	..... ۱-۳ پیشگفتار
۲۸	..... ۲-۳ مدار مجتمع AD7745/46
۳۰	..... ۱-۲-۳ مد خزانی
۳۱	..... ۲-۲-۳ مد ولتاژ/دما
۳۳	..... ۳-۳ توصیف ثبات‌های AD7745/46
۳۵	..... ۴-۳ طرز کار AD7745/46
۳۵	..... ۱-۴-۳ اندازه‌گیری خزانی بر مبنای سیگما-دلتا
۳۷	..... ۵-۳ ارتباط AD7745/46 با میکرو
۳۸	..... AVR ۶-۳
۴۰	..... ۷-۳ ویژگی‌های ATmega16L
۴۱	..... ۸-۳ ارتباط دو سیمه
۴۲	..... ۱-۸-۳ بررسی گذرگاه ارتباط دوسیمه
۴۳	..... ۲-۸-۳ روش ارسال داده
۴۳	..... ۱-۲-۸-۳ وضعیت‌های start و stop
۴۴	..... ۲-۲-۸-۳ قالب‌بندی آدرس
۴۵	..... ۳-۲-۸-۳ قالب‌بندی بسته‌های اطلاعات
۴۵	..... ۹-۳ ارتباط سریال USART
۴۶	..... ۱۰-۳ اندازه ظرفیت خزانی
۴۶	..... ۱-۱۰-۳ صفحه‌های موازی
۴۷	..... ۲-۱۰-۳ میله استوانه‌ای

۴۸	..... لوله استوانه‌ای ۳-۱۰-۳
۴۹	..... خازن‌های چند صفحه‌ای ۴-۱۰-۳
۵۱	..... فصل چهارم: سامانه سخت افزاری و نرم افزاری ۴
۵۲	..... ۱-۴ پیشگفتار
۵۲	..... ۲-۴ سامانه اندازه‌گیری رطوبت خاک
۵۲	..... ۳-۴ مدار اندازه‌گیری رطوبت خاک
۵۳	..... ۱-۳-۴ حسگر خازنی
۵۴	..... ۱-۱-۳-۴ طراحی حسگر خازنی صفحه‌های موازی
۵۵	..... ۲-۳-۴ بخش الکترونیکی
۵۷	..... ۳-۳-۴ بخش نمایشگر
۵۸	..... ۴-۴ اندازه‌گیری رطوبت خاک با روش مقاومتی
۶۰	..... ۵-۴ اندازه‌گیری رطوبت خاک با حسگرهای خازنی و مقاومتی
۶۲	..... ۶-۴ نرم افزار Code vision AVR
۶۳	..... فصل پنجم: نتایج ۵
۶۴	..... ۱-۵ پیشگفتار
۶۴	..... ۲-۵ روش انجام آزمایش خازنی
۶۸	..... ۱-۲-۵ نتایج رطوبت‌سنج خازنی
۶۹	..... ۳-۵ روش انجام آزمایش روش مقاومتی
۷۱	..... ۱-۳-۵ نتایج رطوبت‌سنج مقاومتی
۷۲	..... ۴-۵ نتیجه‌گیری
۷۴	..... ۵-۵ پیشنهادات
۷۵	..... ۶ پیوست

۷۶	.....	۱-۶	ثبات‌های مربوط به کانال خازنی
۷۶	.....	۱-۱-۶	ثبات STATUS
۷۷	.....	۲-۱-۶	ثبات CAP DATA
۷۷	.....	۳-۱-۶	ثبات CAP SET_UP
۷۸	.....	۴-۱-۶	ثبات EXC SET-UP
۷۹	.....	۵-۱-۶	ثبات CONFIGURATION
۸۲	.....	۶-۱-۶	ثبات CAP DAC A
۸۲	.....	۷-۱-۶	ثبات CAP DAC B
۸۳	.....	۱-۷-۱-۶	DAC
۸۵	.....	۸-۱-۶	ثبات CAP OFFSET CALIBRATION
۸۶	.....	۹-۱-۶	ثبات کالیبراسیون بهره خازنی
۸۷	.....	۲-۶	ثبات‌های ولتاژ/جریان
۸۷	.....	۱-۲-۶	ثبات VT DATA
۸۷	.....	۲-۲-۶	ثبات VT SET-UP
۸۹	.....	۳-۲-۶	ثبات CONFIGURATION
۸۹	.....	۴-۲-۶	ثبات کالیبراسیون بهره ولتاژ/جریان
۹۰	.....		مراجع

فهرست شکل‌ها

- شکل (۱-۲): روش نوترونی ۱۰
- شکل (۲-۲): روش گاما ۱۲
- شکل (۳-۲): روش TDR ۱۴
- شکل (۴-۲): اجزای دستگاه TDR ۱۴
- شکل (۵-۲): روش TDT ۱۵
- شکل (۶-۲): روش خازنی و FDR ۱۷
- شکل (۷-۲): روش DPHP ۱۸
- شکل (۸-۲): روش مقاومتی ۱۹
- شکل (۹-۲): روش تانسیومتر ۲۲
- شکل (۱۰-۲): روش سنجش از راه دور ۲۴
- شکل (۱-۳): AD4445 ۲۹
- شکل (۲-۳): AD7746 ۲۹
- شکل (۳-۳): مد خازنی و تک سر AD7745/46 ۳۰
- شکل (۴-۳): مد خازنی و تفاضلی ad7745/46 ۳۰
- شکل (۵-۳): حسگر داخلی دما AD7745/46 ۳۱
- شکل (۶-۳): حسگر خارجی دما AD7745/46 ۳۲
- شکل (۷-۳): مد ولتاژ AD7745/46 ۳۳
- شکل (۸-۳): نمودار پایه سیگما-دلتا ۳۶
- شکل (۹-۳): نمایش کلاک و خروجی برای مبدل سیگما-دلتا ۳۶
- شکل (۱۰-۳): مبدل خازن به دیجیتال ۳۷

- شکل (۳-۱۱): وضعیت start و stop ۴۴
- شکل (۳-۱۲): خازن صفحه‌ای ۴۷
- شکل (۳-۱۳): خازن میله استوانه‌ای ۴۸
- شکل (۳-۱۴): خازن لوله استوانه‌ای ۴۹
- شکل (۳-۱۵): خازن چند صفحه‌ای ۵۰
- شکل (۴-۱): نمودار کلی سخت‌افزار و روند اندازه‌گیری رطوبت ۵۲
- شکل (۴-۲): حسگر خازنی ۵۴
- شکل (۴-۳): حسگر صفحه‌ای طراحی شده ۵۵
- شکل (۴-۴): شماتیک بخش الکترونیکی رطوبت‌سنج خازنی ۵۶
- شکل (۴-۵): طرح جانمایی بخش الکترونیکی رطوبت‌سنج خازنی ۵۶
- شکل (۴-۶): LCD کاراکتری ۵۷
- شکل (۴-۷): ماژول USB به سریال ۵۸
- شکل (۴-۸): شماتیک بخش الکترونیکی رطوبت‌سنج مقاومتی ۵۹
- شکل (۴-۹): طرح جانمایی بخش الکترونیکی رطوبت‌سنج مقاومتی ۵۹
- شکل (۴-۱۰): شماتیک بخش الکترونیکی مدار نهایی ۶۰
- شکل (۴-۱۱): طرح جانمایی بخش الکترونیکی مدار نهایی ۶۱
- شکل (۴-۱۲): مدار نهایی اندازه‌گیری رطوبت خاک ۶۱
- شکل (۵-۱): حسگر خازنی برای آزمایش خازنی ۶۵
- شکل (۵-۲): نمودار ظرفیت خازنی برحسب رطوبت خاک برای خاک ماسه بادی ۶۶
- شکل (۵-۳): نمودار ظرفیت خازنی برحسب رطوبت خاک برای خاک رس ۶۶
- شکل (۵-۴): نمودار مقایسه ظرفیت خازنی برحسب رطوبت خاک برای خاک‌های رس و ماسه ... ۶۷
- شکل (۵-۵): مدار نهایی در حین آزمایش ۶۸

- شکل (۵-۶): نمودار ولتاژ بر حسب رطوبت برای خاک ماسه بادی ۶۹
- شکل (۵-۷): نمودار ولتاژ بر حسب رطوبت برای خاک رس ۷۰
- شکل (۵-۸): نمودار مقایسه ولتاژ بر حسب رطوبت خاک برای خاک های رس و ماسه بادی ۷۰
- شکل (۶-۱): مد خازنی تک سر با غیر فعال بودن CAPDAC ۸۴
- شکل (۶-۲): مد خازنی تک سر با فعال بودن CAPDAC ۸۴
- شکل (۶-۳): مد خازنی تفاضلی با فعال بودن CAPDAC ۸۵

فهرست جدول‌ها

جدول (۱-۲): مقایسه روش‌های اندازه‌گیری رطوبت خاک	۲۶
جدول (۱-۳): ثبات‌های کلی AD7745/46	۳۳
جدول (۱-۵): تکرارپذیری رطوبت‌سنج خازنی	۶۷
جدول (۲-۵): تکرارپذیری رطوبت‌سنج مقاومتی	۷۱
جدول (۳-۵): مقایسه ضریب همبستگی روش‌های اندازه‌گیری رطوبت خاک	۷۲
جدول (۱-۶): ثبات STATUS	۷۶
جدول (۲-۶): ثبات CAP SET_UP	۷۸
جدول (۳-۶): ثبات EXC SET-UP	۷۹
جدول (۴-۶): سطوح سیگنال محرک	۷۹
جدول (۵-۶): ثبات CONFIGURATION	۸۰
جدول (۶-۶): مدهای AD7745/46	۸۰
جدول (۷-۶): نرخ بروزرسانی تبدیل خازنی	۸۱
جدول (۸-۶): ثبات CAP DAC A	۸۲
جدول (۹-۶): ثبات CAP DAC B	۸۲
جدول (۱۰-۶): ثبات VT SET-UP	۸۸
جدول (۱۱-۶): پیکربندی مد ولتاژ/دما	۸۸
جدول (۱۲-۶): نرخ بروزرسانی و زمان تبدیل	۸۹

فصل اول: مقدمه

۱-۱- پیشگفتار

اندازه‌گیری رطوبت خاک در علوم کشاورزی، هیدرولوژی و خاک‌شناسی بسیار حائز اهمیت می‌باشد و اطلاعات مفیدی برای کشاورزی، نظارت پایداری خاک، اکتشاف معدن و نظارت بر سد فراهم می‌کند. هم‌چنین نقش مهمی در سامانه‌های هشداردهنده بلایای طبیعی مانند سیل، طوفان و باران سنگین ایفا می‌کند [۱، ۲].

رطوبت خاک سهم ناچیزی از مقدار آب موجود در جهان را تشکیل می‌دهد اما تقریباً همه فرآیندهای هیدرولوژی اتفاق افتاده در خاک را کنترل می‌کند. به طوری که آب حاصل از نزولات طبیعی را به دو قسمت رواناب و ذخیره زیرزمینی تفکیک می‌کند [۳].

با رشد روزافزون جمعیت انسانی، بشر روز به روز در پی راه‌هایی برای تهیه غذای مورد نیاز این جمعیت می‌باشد. امروزه، مدیریت دقیق در مزرعه باعث افزایش میزان و کیفیت محصول و هم‌چنین محافظت از محیط زیست شده است. یکی از اطلاعات مهم مورد نیاز در فرآیند تصمیم‌گیری در مزرعه اندازه رطوبت خاک می‌باشد.

بحران خشکسالی، محدودیت منابع آب و اتلاف آب از طریق عدم برنامه‌ریزی صحیح آبیاری باعث شده است که مدیریت آبیاری یکی از مهم‌ترین عامل‌های مدیریت مزرعه گردد و زمان و مقدار آبیاری بیش از پیش در مدیریت آبیاری در مزرعه مورد توجه قرار گیرد. با اندازه‌گیری مقدار رطوبت خاک، آبیاران می‌توانند تصمیم بگیرند که در چه زمانی، چه مقدار آب را برای رسیدن به بیش‌ترین حد تولید محصول و کم‌ترین میزان مصرف آب به کار ببرند.

گیاهان برای بقای خود نیاز به آب و مرطوب بودن محیط اطراف ریشه خود دارند. هر گیاه به طور کلی سه میزان رطوبت را در طول عمر خود تجربه می‌کند. سه میزان رطوبت به عنوان سه مرحله

رطوبتی در خاک حائز اهمیت است . مرحله اشباع، ظرفیت و پژمردگی سه مرحله رطوبتی خاک می‌باشند. با شناخت هر مرحله می‌توان میزان عملکرد محصول را افزایش داد و بی‌توجهی به مسائل رطوبتی محیط اطراف ریشه باعث کاهش محصول، می‌شود[۴].

تعیین چگالی و رطوبت خاک در فرآیند اولیه ساخت و سازهایی که به نوعی در رابطه با خاک برداری و خاک ریزی می‌باشند، همانند سدها، سازه‌های ساختمانی و پروژه‌های راه‌سازی از کلیدی‌ترین مفاهیم است که مهندسين به آن توجه می‌کنند.

۱-۲- رطوبت خاک

رطوبت خاک یکی از مهم‌ترین پارامترها در مطالعات محیطی و خاک می‌باشد که به صورت مقدار آب موجود در خاک تعریف می‌گردد که می‌توان آن را به صورت درصد وزنی مقدار رطوبت خاک (w) یا درصد حجمی مقدار رطوبت خاک (θ) بیان نمود[۵]. w به صورت نسبت جرم رطوبت حاضر در نمونه خاک به جرم همان خاک در حالت کاملاً خشک تعریف می‌گردد، در حالیکه، θ به صورت نسبت حجم رطوبت حاضر در خاک به کل حجم خاک تعریف می‌گردد. این دو پارامتر به وسیله معادله (۱-۱) به هم مربوط می‌شوند[۲, ۵, ۶].

$$\theta = w \cdot \left(\gamma_d / \gamma_w \right) \quad (1-1)$$

که γ_d وزن مخصوص (واحد) جرم (توده) خاک و γ_w وزن مخصوص آب می‌باشد.

بریگس^۱ [۷] و تیرزاگی^۲ [۸] سهم بسیار قابل توجهی در فهم برهم کنش خاک و رطوبت داشتند. بریگس بیان کرد که رطوبت خاک در سه حالت رطوبت ثقلی^۳، موئینه‌ای^۴ و هیگروسکوپیک^۵ وجود دارد. رطوبت آزادی که به علت نیروی گرانشی در درون خاک حرکت می‌کند را رطوبت ثقلی می‌گویند. این رطوبت در منفذهای بزرگ وجود دارد و حرکت آنها در خاک زهکشی شده بسیار سریع است و از این رو به عنوان رطوبت قابل دسترس در نظر گرفته نمی‌شود. به طور عادی در ۲ تا ۳ روز بعد از بارندگی از خاک تخلیه می‌شوند. این رطوبت با کمترین مکش از خاک خارج می‌شود. رطوبت حاضر در منفذهای ذره‌ای خاک را رطوبت موئینه‌ای می‌گویند. در تعیین رطوبت خاک، رطوبت موئینه‌ای اندازه‌گیری می‌شود. رطوبت هیگروسکوپیک به شکل یک لایه نازک در اطراف سطح ذرات خاک می‌باشد و در منفذهای خاک نگه داشته نمی‌شود اما روی سطح ذرات است. حذف رطوبت هیگروسکوپیک به علت نیروی جاذبه دشوار است و در موقع خشکسالی با تبخیر خارج می‌شود [۷].

۱-۳- مروری بر پایان‌نامه

در این پژوهش، هدف طراحی و پیادسازی یک سامانه اندازه‌گیری رطوبت خاک با استفاده از مدار مجتمع AD7745/46 می‌باشد. کار این تراشه اندازه‌گیری ظرفیت خازن با دقت بالا (۴fF) می‌باشد و در زمینه‌های اندازه‌گیری فشار، سنجش رطوبت، موقعیت و میزان ناخالصی در مواد کاربرد دارند. در حال حاضر روش رایج برای اندازه‌گیری رطوبت خاک در کشاورزی روش بازتاب سنجی حوزه زمان (TDR^۶) می‌باشد که دستگاه‌های اندازه‌گیری که هم اکنون برای این منظور به کار برده می‌شوند بسیار پرهزینه و

1 Briggs

2 Terzaghi

3 Gravitational moisture

4 capillary moisture

5 hygroscopic moisture

6 Time Domain Reflectometry

غیربومی است. امید است با انجام این تحقیق و توسعه‌ی آن بتوان یک محصول با قیمت مناسب و به صورت بومی عرضه نمود.

این پایان نامه شامل ۵ فصل می‌باشد. مقدمه‌ای در مورد رطوبت خاک و اهمیت اندازه‌گیری آن در فصل اول ارائه شده است. پژوهشگران از روش‌های گوناگون برای اندازه‌گیری رطوبت خاک استفاده می‌کنند. به برخی از این روش‌ها در فصل دوم اشاره می‌شود. در فصل سوم درباره‌ی مدار مجتمع AD7745/46 و ویژگی آن به تفصیل توضیح داده می‌شود. جزئیات سخت افزاری سامانه اندازه‌گیری رطوبت خاک در فصل چهارم بیان می‌شود. نتایج و توضیحات مربوط به آن و پیشنهادات برای کارهای آینده در فصل پنجم مورد بحث قرار گرفته است.

فصل دوم: مروری بر کارهای گذشته

۲-۱- پیشگفتار

در سال‌های اخیر پژوهشگران روش‌های گوناگونی برای برآورد رطوبت خاک (در قالب‌های حجمی و جرمی) به کار برده‌اند که دقت و سرعت اندازه‌گیری در این روش‌ها دارای اهمیت ویژه‌ای است. در این فصل به روش‌های مختلف اندازه‌گیری رطوبت خاک و مزایا و معایب آنها اشاره شده است.

۲-۲- روش‌های اندازه‌گیری رطوبت

پژوهشگران برای برآورد رطوبت خاک از روش‌های گوناگونی استفاده نمودند که می‌توان به روش‌های مستقیم و غیرمستقیم برای اندازه‌گیری در جا و آزمایشگاهی طبقه‌بندی نمود. روش‌های اندازه‌گیری مستقیم رطوبت خاک شامل گرما_وزنی^۱ و روش کاربید کلسیم^۲ می‌باشند [۵, ۶, ۹-۱۱]، در حالیکه روش‌های پراکندگی نوترونی، میرایی گاما، حسگر مقاومتی، روش‌های نوری، سنجش از راه دور، TDR، FDR^۳ و TDT^۴ روش‌های نمونه‌هایی از روش غیرمستقیم می‌باشند.

۲-۲-۱- روش‌های اندازه‌گیری مستقیم رطوبت خاک

اندازه‌گیری مستقیم رطوبت خاک بر مبنای جابه‌جایی رطوبت خاک به وسیله تبخیر و واکنش شیمیایی می‌باشد. این روش اندازه‌گیری شامل اندازه‌گیری‌های گرما-وزنی و کاربید کلسیم است. روش گرما-وزنی به طور گسترده برای اندازه‌گیری مقدار رطوبت خاک استفاده می‌گردد و به عنوان مرجع استاندارد برای تعیین مقدار رطوبت خاک شناخته می‌شود. در این روش، نمونه خاک مرطوب (معمولاً ۱۰۰ گرم یا کمتر) به مدت ۲۴ ساعت در داخل یک کوره در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد قرار می‌گیرد و

¹ Thermo_Gravimetric

² CaC₂

³ Frequency Domain Reflectometry

⁴ Time Domain Transmissometry

وزن خاک پس از خشک شدن، گزارش می‌شود. البته این دما برای خاک‌های آلی و گچ‌مانند ۵۰ تا ۷۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد، به این دلیل که ماده آلی ممکن است به علت تبخیر در دماهای بالا از بین بروند. این روش اندازه‌گیری دقیق مقدار رطوبت خاک را تضمین می‌کند و وابسته به شوری و نوع خاک نمی‌باشد. این روش از نوع مخرب به شمار می‌رود، بخاطر اینکه نمونه خاک در داخل کوره خشک‌کنندگی نمی‌تواند برای اندازه‌گیری‌های تکراری استفاده شود [۱۲]. هایلیل^۱ گزارش کرد که برخی از خاک‌های رس ممکن است حتی در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد شامل مقدار محسوسی رطوبت باشند. همچنین بیان کرد که برخی از مواد آلی ممکن است در این دما اکسید و تجزیه شوند به طوری که وزن از دست داده شده کاملاً به علت تبخیر رطوبت نباشد [۱۰].

روش کاربرد کلسیم یک روش سریع برای تعیین رطوبت خاک می‌باشد و در آزمایشگاه و کشتزار (زمین) به کار می‌رود. مقدار رطوبت خاک به وسیله افزایش فشار گاز به علت واکنش شیمیایی کاربرد کلسیم با رطوبت حاضر در خاک تعیین می‌گردد. در نتیجه واکنش شیمیایی کاربرد کلسیم و رطوبت، گاز استیلن تولید می‌شود و گاز حاصل از واکنش در یک محفظه مهروموم شده نگهداری می‌گردد و فشار گاز این محفظه به وسیله فشارسنج اندازه‌گیری می‌شود. گاز استیلن حاصل از واکنش متناسب با مقدار رطوبت موجود در خاک می‌باشد. در خاک رس پرمایه یا خاک‌هایی که به اندازه کافی شکننده نمی‌باشند مقداری رطوبت در داخل کلوخ‌ها یا قپه‌ها محبوس می‌باشند و نمی‌توانند با واکنشگر کاربرد کلسیم در تماس باشند در نتیجه مقدار رطوبت اندازه‌گیری شده دقیق و درست نمی‌باشد. به‌علاوه، برای ۲۰ گرم نمونه تقریباً ۲۲ گرم واکنشگر کاربرد کلسیم نیاز است تا قابلیت اجرای آزمایش را داشته باشد.

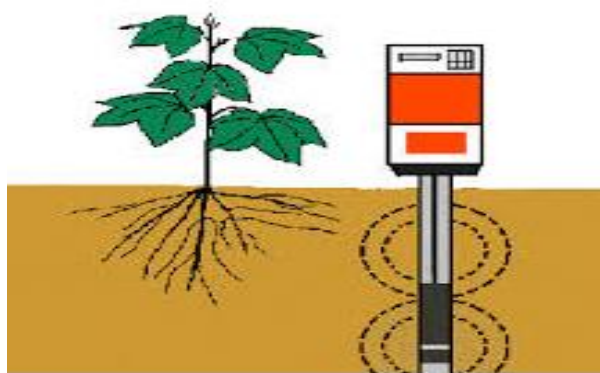
¹ Hillel

۲-۲-۲- روش‌های اندازه‌گیری غیرمستقیم رطوبت خاک

روش‌های اندازه‌گیری غیرمستقیم رطوبت خاک از خواص الکتریکی خاک (ثابت دی‌الکتریک، امپدانس، ظرفیت خازنی و مقاومت ویژه)، پتانسیل رطوبت خاک، اشعه مادون قرمز و مواد پرتوزا استفاده می‌کنند. این روش‌ها به جز اشعه مادون قرمز، می‌تواند برای تعیین مقدار رطوبت برای کاربردهای آزمایشگاهی و درجا استفاده شوند.

۲-۲-۲-۱- روش پراکندگی نوترونی

سنجش نوترونی رطوبت^۱ (NMM) از روش پراکندگی نوترونی استفاده می‌کند. این روش مقدار رطوبت خاک را به صورت درصد حجمی θ برآورد می‌کند. NMM از یک منبع نوترون‌های سریع (با میانگین انرژی ۵ مگاالکترون ولت، MeV) و یک آشکارساز آهسته نوترونی (eV ۰/۰۲۵ در ۲۷ درجه سانتی‌گراد) استفاده می‌کند. پایداری منبع نسبتاً کم است (۰/۳۷ یا ۱/۸۵ Giga Becquerel) و منابع به علت پرتوآیی بودنشان در یک محفظه مهروموم شده‌اند [۱۳].



شکل (۲-۱) : روش نوترونی

¹ Neutron Moisture Meters

همانطور که در شکل (۱-۲) نشان داده شده است گمانه^۱ را در داخل یک لوله می‌گذارند و سپس برای بدست آوردن داده لوله را درون خاک قرار می‌دهند. بخش مداری که در داخل جعبه می‌باشد در سطح خاک باقی می‌ماند. هنگامی که دستگاه اندازه‌گیری در حال استفاده نباشد، گمانه درون یک غلاف پلاستیکی محافظ قرار داده می‌شود [۱۴]. نوترون‌های سریع (انرژی بالا) از یک منبع پرتوزا ساطع می‌شوند. این نوترون‌ها با برخورد با هسته‌های هیدروژن حاضر در خاک کند می‌شوند سپس به وسیله یک آشکارگر "نوترون آهسته" آشکارسازی می‌گردد. بخاطر اینکه بیشتر اتم‌های هیدروژن حاضر در خاک اجزای مولکول رطوبت است، میزان نوترون‌های کند شده نشان دهنده مقدار رطوبت خاک می‌باشد [۱۵].

[۱۶].

این یک روش اندازه‌گیری بسیار سریع است که زمان پاسخ‌دهی یک تا دو دقیقه دارد. این روش امکان اندازه‌گیری یک حجم بزرگ خاک را فراهم می‌کند و هم‌چنین امکان پوشش (کاوش مرحله به مرحله) در چندین عمق برای بدست آوردن پروفایل توزیع خاک را ارائه می‌دهد. NMM به عنوان دقیق-ترین روش برای اندازه‌گیری مقدار رطوبت خاک در نظر گرفته می‌شود. این روش غیرمخرب است و رطوبت را می‌تواند در هر میزانی اندازه‌گیری کند. هزینه بالا دستگاه، درجه پایین وضوح مکانی و خطر سلامتی مربوط به قرار گرفتن در معرض تابش زیان‌بار، معایب بزرگ این روش می‌باشند [۱۷]. این دستگاه نزدیک سطح خاک تا عمق کمتر از ۰/۳ متر حساس نیست. جابه‌جایی این دستگاه از یک مکان اندازه‌گیری به مکان دیگر بسیار دشوار است [۱۲]. فیتیوس^۲ و همکارانش از یک گمانه نوترونی برای تعیین مقدار رطوبت

¹ Probe

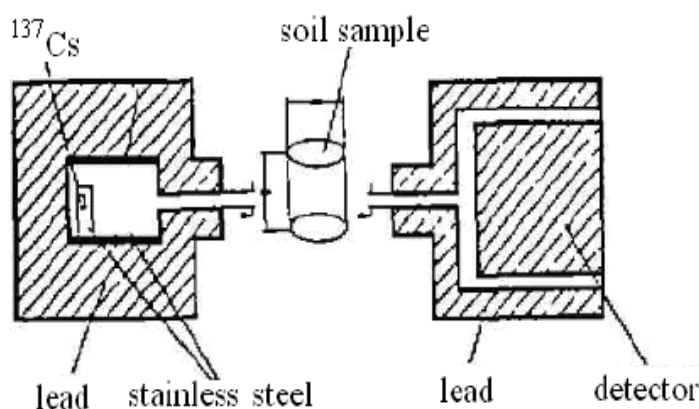
² Fityus

خاک از یک خاک گسترده^۱ استفاده نمودند [۱۸].

۲-۲-۲-۲- روش میرایی پرتو گاما

روش میرایی پرتو گاما یک روش پرتوزا است که برای تعیین مقدار رطوبت خاک استفاده می‌شود.

این روش محدود به عمق خاک ۲۵ میلی‌متری یا کمتر با وضوح بالا می‌باشد.



شکل (۲-۲): روش گاما [۱۹]

در این روش معمولاً از چشمه رادیواکتیو ^{137}Cs استفاده می‌شود. همانطور که در شکل (۲-۲) نشان داده شده است، منبع رادیواکتیو در داخل محفظه سربی قرار می‌گیرد. وقتی که اشعه گاما وارد یک شی شود، براساس اثر فوتوالکتریک و اثر پراکندگی کامپتون، شدتی از فوتونها جذب خواهند شد. بنابراین وقتی که شدت معینی از اشعه گاما ساطع شده از منبع رادیواکتیو از یک نمونه خاک عبور کند، شدت بخش انتقال یافته آن بسته به اندازه رطوبت و چگالی آن تغییر می‌کند. بنابراین با استفاده از یک آشکارساز اشعه گاما تعداد فوتون ها در یک دوره تناوب معین از زمان انتقال شمرده می‌شود. کاهش شدت تابش بستگی به چگالی و رطوبت خاک، و همچنین فاصله‌ای که تابش در خاک طی می‌کند، دارد [۱۹]. این یک روش درجا و غیرمخرب است که زمان پاسخ‌دهی تقریباً کمتر از یک دقیقه دارد که مقدار رطوبت حجمی را

¹ expansive

اندازه‌گیری می‌کند. این روش به وسیله تغییرات چگالی حجمی خاک تحت تاثیر قرار گیرد. پرتوی گاما از NMM پرخطرتر می‌باشد و هزینه عملی روش میرایی گاما نسبتاً زیاد است [۱۲].

۲-۲-۳- روش‌های دی‌الکتریک

روش خازنی، TDR، TDT و FDR عمده‌ی روش‌هایی هستند که از خواص دی‌الکتریک خاک برای اندازه‌گیری مقدار رطوبت خاک استفاده می‌کنند. وجود اختلاف بزرگ در ثابت دی‌الکتریک خاک خشک (۲ تا ۵) و آب خالص (۸۱) مبنای استفاده از این روش می‌باشد [۲۰-۲۵]. تاثیر قابل چشم‌پوشی دما روی اندازه‌گیری گذردهی الکتریکی موجب می‌شود که TDR و FDR رطوبت خاک را در خاک‌های کم عمق دقیق‌تر تعیین کنند [۲۱، ۲۶].

۲-۲-۳-۱- روش TDR

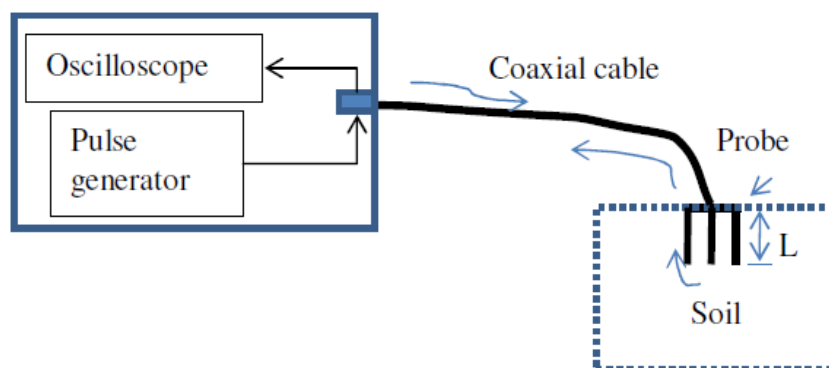
در سال ۱۹۸۰ تاپ^۱ و همکارانش نشان دادند که TDR برای اندازه‌گیری رطوبت خاک مناسب می‌باشد. در دهه‌های بعد مقدار زیادی حسگرهای TDR و سامانه‌های اندازه‌گیری برای رطوبت خاک توسعه یافتند. امروزه TDR به طور رایج به عنوان روشی برای اندازه‌گیری رطوبت خاک در کاربردهای مختلف استفاده می‌شود. اساس روش TDR تغییرات ثابت دی‌الکتریک خاک بر اثر تغییر رطوبت خاک می‌باشد [۲۷]. دستگاه TDR امواج الکترومغناطیسی را راه اندازی می‌کند و سپس فاصله زمانی بین امواج تابیده شده از منبع به سوی خط و امواج بازتاب شده از انتهای خط، اندازه‌گیری می‌شود. تفاوت بزرگ بین ثابت دی‌الکتریک آب و اجزای خاک موجب می‌شود که زمان گذار پالس وابسته به مقدار رطوبت حجمی θ توده خاک شود و به وسیله این زمان گذار، گذردهی الکتریکی نمونه خاک معین می‌شود [۲۷].

^۱ Topp



شکل (۳-۲): روش TDR [۲۷]

معمولا این دستگاه از چهار عنصر اصلی تشکیل می گردد: یک ژنراتور پالس، یک کابل هم محور، یک نمونه بردار واسیلوسکوپ، شکل (۴-۲) [۲۹].

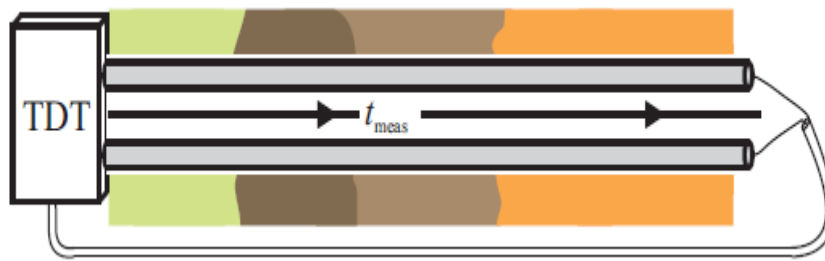


شکل (۴-۲): اجزای دستگاه TDR

وضوح زمانی بالا، پاسخدهی سریع (تقریبا ۲۸ ثانیه) و تکرارپذیری اندازه گیری از مزیت های TDR می باشد. این روش می تواند تا فرکانس ۱ گیگا هرتز کار کند و اندازه گیری آن مستقل از بافت خاک، دما و میزان شوری می باشد. در انجام اندازه گیری درجا بلند مدت مفید است و می تواند به طور خودکار انجام گردد. اشکال بزرگ این دستگاه هزینه بالا این دستگاه می باشد [۲۸].

۲-۲-۲-۲-۲- روش TDT

اندازه گیری دی الکتریک یک روش معمول برای اندازه گیری مقدار رطوبت خاک می باشد. چندین روش تثبیت شده برای تعیین ثابت دی الکتریک در مواد همگن و غیرهمگن قابل دسترس می باشند. اندازه گیری TDT، یک روش تثبیت شده برای اندازه گیری ثابت دی الکتریک (گذردهی) مواد مختلف به ویژه خاک می باشد. روش اندازه گیری زمان تاخیر (TDT) یک فناوری نوین و در حال پیشرفت می باشد و به علت وابستگی سرعت انتشار امواج الکترومغناطیسی به دی الکتریک محیط انتشار، به طور رایج برای تعیین رطوبت خاک استفاده می گردد. روش های جدید اندازه گیری زمان تاخیر بر مبنای مفهوم جدید موج بر می باشد که امکان انجام اندازه گیری انتقال در خاک را ارائه می دهد (شکل (۲-۵)). خاک یک ماده ناهمگن است، یعنی دارای لایه های مختلف مواد و اندازه های متفاوت می باشد. بنابراین موج تابیده شده در این محیط می تواند دارای چندین بازتاب باشد. روش هایی که بر مبنای بازتاب موج می باشند، این بازتاب های چندگانه در اندازه گیری مزاحمت ایجاد می کنند و باعث کاهش دقت اندازه گیری می گردد. روش TDT اولین پالس بازتاب یافته که دارای اطلاعات ضروری است، را اندازه گیری می کند و بازتاب های چندگانه را با استفاده از روش قطع متناوب حذف می کند. بدین صورت بازتاب های دیگر در این اندازه گیری مزاحمت ایجاد نمی کنند.



شکل (۲-۵): روش TDT [۲۷]

مزیت کلیدی روش اندازه گیری زمان تاخیر مقاومتش در برابر بازتاب های چندگانه در حسگر می باشد. به علاوه، شکل پالس کمتر به وسیله بازتاب های چندگانه تحت تاثیر قرار می گیرد در نتیجه پردازش سیگنال آسان می شود و طراحی آن مقرون به صرفه می گردد. به علت این مزایا، چندین حسگر رطوبت خاک TDT صنعتی در دهه های گذشته ارائه شده اند [۲، ۲۷، ۳۰].

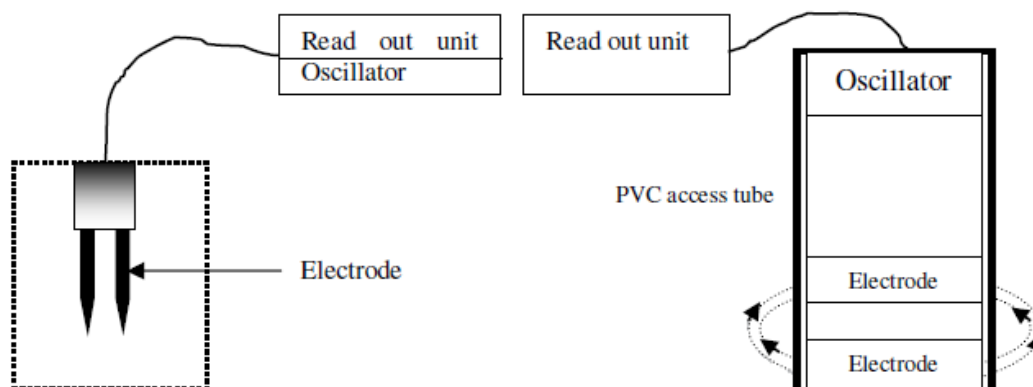
۲-۲-۳-۳-۲-۲ روش خازنی و FDR

روش های خازنی که برای اندازه گیری رطوبت خاک استفاده می شوند شامل دو بخش می باشند.

بخش اول: مدار نوسان ساز

بخش دوم: یک حسگر که در داخل خاک قرار می گیرد.

همانطور که در شکل (۲-۶) نشان داده شده است، حسگرهای خازنی شامل یک جفت جوشن (میله های موازی یا حلقه های فلزی حلقوی) است درون خاک قرار می گیرد و تشکیل یک خازن می دهند به طوری که خاک به عنوان دی الکتریک آن می باشد [۳۱-۳۴]. در صورتی که این خازن در مدار تشدید یک نوسان ساز به کار رود، تغییر خازن موجب تغییر بسامد نوسان ساز می شود. بنابراین تغییرات رطوبت خاک باعث تغییر خازن و در نتیجه بسامد نوسان ساز (۱۵۰-۱۰ MHz) می شود. در روش خازنی با پایش ظرفیت خازن می توان رطوبت خاک را برآورد کرد.



شکل (۶-۲): روش خازنی و FDR

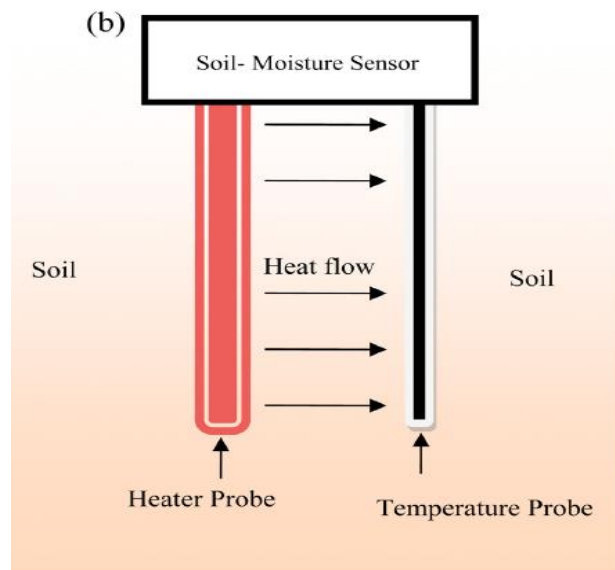
قاعده کلی اندازه‌گیری FDR شبیه روش خازنی است اما در این روش رطوبت خاک از پایش بسامد نوسان‌ساز برآورد می‌شود. اندازه‌گیری رطوبت خاک را به صورت درصد حجمی بیان می‌کنند و پاسخدهی آنها به صورت لحظه‌ای می‌باشد. پایداری بلند مدت این روش‌ها سوال برانگیز است و هزینه اولیه این دستگاه‌ها زیاد است اما نسبتاً کمتر از TDR است.

مزیت این روش عبارتند از:

- ۱- مقدار رطوبت مطلق خاک را ارائه می‌دهد.
- ۲- در هر عمقی می‌تواند مقدار رطوبت خاک را تعیین نماید.
- ۳- حسگر می‌تواند در اندازه‌های مختلف باشد در نتیجه محدوده‌ی اندازه‌گیری قابل تنظیم است.
- ۴- هنگامی که غلظت یونی خاک ثابت باشد، دقت نسبتاً بالایی دارد.
- ۵- نتایج اندازه‌گیری می‌تواند با روش از راه دور خوانده شوند [۱۲].

۲-۲-۲-۴- روش DPHP

حسگر^۱ DPHP دارای دو گمانه به نام‌های گمانه بخاری و گمانه حسگر دما می‌باشد، شکل (۲-۷). این روش مقدار رطوبت حجمی خاک را اندازه‌گیری می‌نماید. هنگامی که ولتاژ DC به گمانه گرم کننده اعمال گردد دمای آن افزایش می‌یابد سپس گرمای حاصل به خاک مجاور گمانه گرم کننده انتقال می‌یابد و گمانه حسگر دما که ترموکوپل نوع T است، افزایش دمای خاک را اندازه‌گیری می‌کند [۵، ۳۵].



شکل (۲-۷): روش DPHP [۳۵]

ظرفیت حرارتی خاک رابطه مستقیم با مقدار رطوبت خاک دارد، به طوری که هرچه مقدار رطوبت بیشتر باشد، ظرفیت حرارتی خاک نیز افزایش می‌یابد. ظرفیت حرارتی بالاتر بدین معناست که به ازای دریافت انرژی گرمایی معینی، افزایش دمای کمتری دارد. بنابراین هرچه مقدار رطوبت خاک بیشتر باشد، ظرفیت حرارتی آن نیز بیشتر خواهد بود. حسگر DPHP مقدار انرژی معینی را به خاک اطراف گمانه گرم کننده می‌دهد، افزایش دما به وسیله یک دماسنج اندازه‌گیری می‌شود. در نتیجه می‌توان مقدار رطوبت

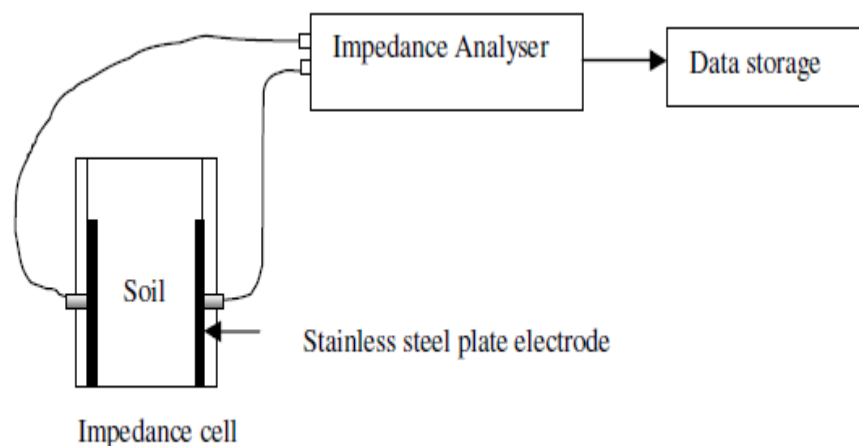
¹ Dual Probe Heat Pulse

خاک را می توان برحسب تغییرات دمایی خاک برآورد نمود.

علی رغم دقت روش DPHP، این روش به علت مصرف انرژی بالا و هزینه بالا به طور گسترده استفاده نمی شود [۳۵، ۳۶].

۲-۲-۲-۵- روش مقاومتی

روش های الکترومغناطیس به روش هایی گفته می شود که از تاثیر رطوبت خاک بر خواص الکتریکی خاک بهره می گیرند. مقاومت خاک وابسته به مقدار رطوبت است، از این رو از آن می توان برای تعیین مقدار رطوبت خاک استفاده نمود. برای اندازه گیری مقاومت می توان از مقاومت دو الکتروود که درون خاک قرار داده شده است، استفاده کرد (شکل ۲-۸)). با پایش مقاومت می توان مقدار رطوبت خاک را تعیین نمود. این روش به کالیبراسیون دقیق نیاز دارد. هزینه روش مقاومتی زیاد می باشد. این روش مقدار رطوبت حجمی خاک را در کاربردهای آزمایشگاهی و درجا اندازه گیری می کند و پاسخدهی آن لحظه ای است [۳۷].



شکل (۲-۸): روش مقاومتی

مزیت های روش مقاومتی:

- ۱- از لحاظ نظری، می تواند مقدار رطوبت مطلق خاک را اندازه گیری نمود.
- ۲- مقدار رطوبت را می تواند در هر عمق را تعیین نمود.
- ۳- اگر غلظت یونی خاک ثابت باشد دقت نسبتا بالایی دارد.
- ۴- حسگر می تواند در اندازه های مختلف باشد در نتیجه محدوده ی اندازه گیری قابل تنظیم است.
- ۵- نتایج می تواند از راه دور خوانده شود [۱۲].

۲-۲-۲-۶- روش بلوک گچی

یک روش ساده برای اندازه گیری رطوبت خاک استفاده از بلوک های گچی است که به نام بلوک های مقاومت نیز شناخته شده اند. به طور کلی، بلوک های مقاومت، شامل یک جفت الکتروود هستند که داخل یک محیط متخلخل مانند گچ، نایلون و پشم شیشه جاسازی می شوند. علی رغم مطلوب بودن این بلوکها از نظر ارزانی و سادگی کاربرد، مشکلاتی در این بلوکها وجود دارد که عمده ترین آنها مساله واسنجی بلوک است. واسنجی بلوک به معنای تعیین منحنی مشخصه مقاومت بر حسب مقدار رطوبت خاک می باشد. این مساله می تواند بسیار محدود کننده باشد، چرا که این منحنی واسنجی از بلوکی به بلوک دیگر و از خاکی به خاک دیگر متغیر است. از اشکال دیگر این روش طول عمر محدود آن می باشد. زمان پاسخدهی این روش دو تا سه ساعت است [۱۲].

۲-۲-۷- روش تانسیومتر

اندازه‌گیری ماتریک بالقوه با وسایل ساده‌ای به نام تانسیومتر^۱ انجام می‌شود که به طور مستقیم ماتریک بالقوه را اندازه‌گیری می‌کند. تانسیومترهای موجود عبارتند از: تانسیومتر جیوه‌ای، فلزی و الکترونیکی. هر یک از تانسیومترها کاربرد خاص خود را دارند. تانسیومتر جیوه‌ای لوله‌ی ساده و خمیده پرآبی است که یک طرف آن منتهی به کلاهک سرامیکی است و انتهای دیگر داخل یک مخزن جیوه‌ای می‌شود. هنگامی که کلاهک سرامیک داخل خاک قرار می‌گیرد، پس از مدتی توازن پتانسیل بین رطوبت حاضر در خاک و آب موجود در تانسیومتر برقرار می‌گردد. برقراری تعادل با ورود و خروج آب به داخل لوله تانسیومتر از طریق کلاهک که نسبت به آب نفوذپذیر است، انجام می‌گیرد. به طور مثال اگر خاک خشک باشد، آب را از داخل لوله تانسیومتر به طرف خود می‌کشد. در این وضعیت خلاء ایجاد شده در لوله تانسیومتر موجب می‌شود که در طرف دیگر لوله، جیوه صعود نماید. مقدار بالا آمدن جیوه متناسب با پتانسیل رطوبت حاضر در خاک است. تانسیومتر جیوه‌ای بیشتر در کارهای آزمایشگاهی و تحقیقاتی استفاده می‌شود و چون کاربرد آنها در بیرون از آزمایشگاه مشکل است، در مزرعه و صحرا بیشتر از تانسیومتر فلزی استفاده می‌شود. این تانسیومتر اساساً شبیه تانسیومتر جیوه‌ای هستند با این تفاوت که در آنها به جای خلاءسنج جیوه‌ای از خلاءسنج فلزی استفاده می‌گردد تا حمل و نقل آن آسان باشد. تانسیومتر فلزی از یک لوله پرآب تشکیل شده است که قسمت زیرین آن یک کلاهک سرامیکی و قسمت بالایی آن مسدود شده است، به طوری که اگر آب از کلاهک سرامیکی خارج شود در داخل لوله خلاء ایجاد می‌گردد. میزان این خلاء به وسیله خلاءسنج اندازه‌گیری می‌شود. تانسیومتر الکترونیکی کارایی مشابه با تانسیومترهای دیگر دارد با این تفاوت که از خلاءسنج الکترونیکی استفاده می‌کند. شکل (۲-۹) تانسیومتر را نشان می‌دهد. تانسیومتر برای مقدار خلاء یا فشار منفی بالاتر از یک اتمسفر کارایی

^۱ Tensiometric

ندارد بخاطر اینکه حباب‌های هوا وارد تانسیومتر می‌شود و اندازه‌گیری درست نمی‌باشد. زمان پاسخدهی این روش دو تا سه ساعت است.



شکل (۲-۹): تانسیومتر

معایب این روش عبارتند از:

- ۱- محدوده فشار ۰ تا ۰/۸ بار^۱ برای خاک شنی مناسب نیست.
- ۲- تبدیل داده به مقدار حجمی رطوبت خاک دشوار می‌باشد.
- ۳- بسته به محدوده‌ی اندازه‌گیری به تعمیر و نگهداری منظم (روزانه یا هفتگی) نیاز دارد.
- ۴- احتمال شکستگی در مرحله نصب و راه‌اندازی وجود دارد.
- ۵- سامانه‌های خودکار پرهزینه هستند و به طور الکتریکی پایدار نیستند.

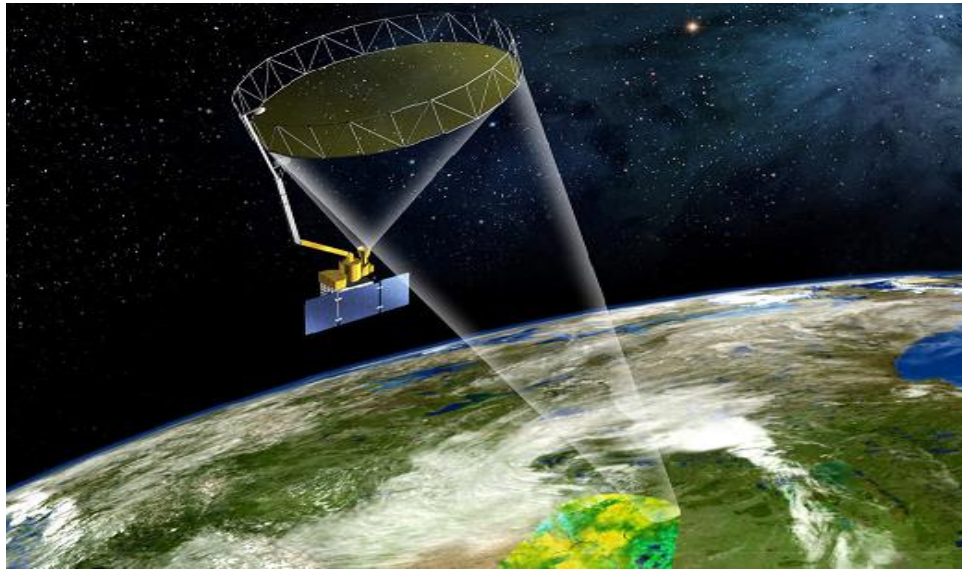
^۱ Bar

مزایای این روش عبارتند از:

- ۱- تانسیومتر برای سامانه آبیاری پیشنهاد می‌شود.
- ۲- ساخت آسان و ارزان است.
- ۳- در محدوده‌ی اشباع کار می‌کند.
- ۴- اگر به طور مناسب نگهداری شود می‌تواند برای مدت طولانی کار کند.
- ۵- در خاک یخ زده با اتیلن گلیکول می‌تواند کار کند [۱۲].

۲-۲-۲-۸- روش سنجش از راه دور

مقدار رطوبت خاک به طور مستقیم به وسیله سنجش از راه دور اندازه‌گیری می‌شود. پیشرفت‌های اخیر در فن آوری سنجش از راه دور نشان می‌دهد که رطوبت خاک را می‌توان به وسیله روش‌هایی که از طیف الکترومغناطیس استفاده می‌کنند مانند ماهواره‌ی و میکروویو (رادار) اندازه‌گیری کرد (شکل ۲-۱۰) [۳۸, ۳۹]. سنجش از راه دور بستگی به انرژی بازتاب شده از سطح زمین دارد. برای تعیین رطوبت خاک از میکروویو (که بخشی از طیف الکترومغناطیسی است) استفاده می‌شود. شدت انرژی بازتاب شده از خاک بسته به ثابت دی‌الکتریک خاک، دمای خاک و یا ترکیبی از این دو تغییر می‌کند [۱۲].



شکل (۲-۱۰): روش سنجش از راه دور

محدوده‌ی فرکانسی موج میکروویو ۳GHZ تا ۳۰GHZ می‌باشد. میکروویو می‌تواند از ابرها نفوذ کند بنابراین می‌تواند در تمام شرایط آب و هوایی کار کند. میکروویو همچنین حساس به حضور رطوبت در خاک و سبزیجات می‌باشد در نتیجه می‌توان از میکروویو برای اندازه‌گیری رطوبت خاک استفاده کرد [۴۰]. مبنای نظری بین تعیین رطوبت خاک به وسیله میکروویو اختلاف بزرگ بین ثابت دی‌الکتریک آب و خاک خشک می‌باشد. روش میکروویو برای اندازه‌گیری رطوبت خاک شامل میکروویو فعال و غیرفعال است که هر کدام دارای مزیت‌هایی می‌باشند و انتخاب آنها برای اندازه‌گیری رطوبت خاک بستگی به هدف مأموریت دارد. مزایایی این روش تعیین رطوبت خاک از راه دور و در مقیاس بزرگ می‌باشد. این روش فقط رطوبت لایه سطحی خاک را تعیین می‌کند و سامانه اندازه‌گیری آن بزرگ و گران است. بافت خاک، پوشش گیاهی و زبری سطح، پارامترهای موثر در بازیابی رطوبت خاک در سنجش از راه دور می‌باشند. زمان پاسخدهی این روش لحظه‌ای است [۳۸، ۴۰-۴۴].

۲-۲-۲-۹- روش نوری

روش‌های نوری بر مبنای تغییر مشخصات نور تابشی و بازتابی است وقتی که از میان خاک عبور می‌کند. این روش‌ها از حسگر الیاف نوری، نور قطبیده^۱ و حسگر نور نزدیک مادون قرمز^۲ استفاده می‌کنند [۶، ۱۲، ۴۵-۴۷]. روش نور قطبیده بر این اصل استوار است که حضور رطوبت در سطح بازتاب موجب قطبش پرتوی بازتاب شده می‌گردد. میزان قطبش پرتو بستگی به میزان رطوبت خاک دارد. کالیبراسیون این روش تحت تاثیر نوع خاک و زبری سطح خاک می‌باشد. در روش حسگر الیاف نوری از الیاف بدون روکش که درون خاک قرار می‌گیرد، استفاده می‌شود. میرایی نور الیاف با مقدار رطوبت خاک که در تماس با الیاف است، تغییر می‌کند. ضریب شکست و زاویه اصطکاک داخلی نور با مقدار رطوبت تغییر می‌کند. چندین باند جذب رطوبت در نزدیکی مادون قرمز وجود دارد که مهمترین آنها دارای طول موج‌های ۱۴۵۰ nm، ۱۹۴۰ nm و ۲۹۵۰ nm می‌باشند. از این رو، روش نزدیک به مادون قرمز برای پایش مقدار رطوبت خاک استفاده می‌گردد. این روش وابسته به جذب مولکولی در طول موج مشخص به وسیله رطوبت حاضر در لایه‌های سطحی می‌باشد. این روش سریع و بدون تماس است و نتایج به مشخصات سطحی خاک وابسته است. دقت اندازه‌گیری در این روش تحت تاثیر تاج (سایبان) پوشش گیاهی می‌باشد [۶، ۴۵، ۴۶].

جدول (۱-۲) مقایسه چند روش رایج اندازه‌گیری رطوبت خاک را نشان می‌دهد.

^۱Polarized Light

^۲Near Infrared

جدول (۱-۲): مقایسه روش‌های اندازه‌گیری رطوبت خاک

روش	انعطاف پذیری	عمق اندازه-گیری	اصل اندازه-گیری	خصوصیات ویژه	زمان پاسخدهی	پارامتر اندازه-گیری	نکته
وزنی	مقیاس آزمایشگاهی	هر عمق	واکنش شیمیایی / تبخیر	۱۰۵ درجه سانتی‌گراد	۲۴ ساعت	مقدار وزنی رطوبت خاک	خطر سلامت ندارد- آزمایش مخرب- زمان‌بر
نوترونی	درجا	کمتر از ۰/۳ متر	پراکندگی نوترونی	ورودی نوترون‌های سریع با انرژی ۵ الکترولت	۱-۲ دقیقه	مقدار حجمی رطوبت خاک	خطر سلامتی ندارد- برای خاک‌های زیرسطحی مناسب است
TDR	درجا / مقیاس آزمایشگاهی	۰/۲-۰/۶ متر	ثابت دی-الکتریک	فرکانس عملیاتی تا ۱ گیگاهرتز	۲۸ ثانیه	مقدار حجمی رطوبت خاک	خطر سلامتی ندارد- وابسته به فرکانس است- برای خاک‌های خیلی شور مناسب نیست
خازنی / FDR	درجا / مقیاس آزمایشگاهی	۱ متر	ثابت دی-الکتریک	فرکانس عملیاتی ۱۰-۱۵۰ گیگاهرتز	لحظه‌ای	مقدار حجمی رطوبت خاک	خطر سلامتی ندارد- نیاز به کالیبراسیون دارد- برای خاک‌های خیلی شور مناسب نیست- وابسته به فرکانس است
مقاومتی	درجا / مقیاس آزمایشگاهی	۰/۱-۰/۳ متر	مقاومت الکتریکی	۱-۱۵ اتمسفر	۲-۳ ساعت	مقدار حجمی رطوبت خاک	زمان‌بر- خطر سلامتی ندارد
تانسیومتر	درجا / مقیاس آزمایشگاهی	۰/۱۵-۰/۶ متر	مکش و کشش منفی ایجاد شده	۰-۱ اتمسفر	۲-۳ ساعت	فشار	خطر سلامتی ندارد- روش غیرمستقیم- زمان‌بر

- فصل سوم: مبانی نظری و عملی

۳-۱- پیشگفتار

در این فصل به جزئیات بیشتر در مورد مدارمجمع AD7745/46 پرداخته می‌شود. هم‌چنین انواع حسگرهای خازنی مورد بررسی قرار گرفته شده است.

۳-۲- مدارمجمع AD7745/46

مدارمجمع AD7745/46 یک تبدیل کننده خازنی به دیجیتال ۲۴ بیتی می‌باشد که توسط شرکت Analoge Devices ارائه شده است. برخی از ویژگی‌های این مدارمجمع در زیر آورده شده است.

۱- تبدیل کننده ظرفیت خازنی به دیجیتال

۲- پیروی از پروتکل ارتباط سریال دو سیمه

۳- کاربرد در حسگر شناور تکی و تفاضلی

۴- ظرفیت مد مشترک تا 17pF

۵- محدوده ظرفیت خازن $\pm 4\text{pF}$

۶- وضوح 4aF

۷- دقت 4fF

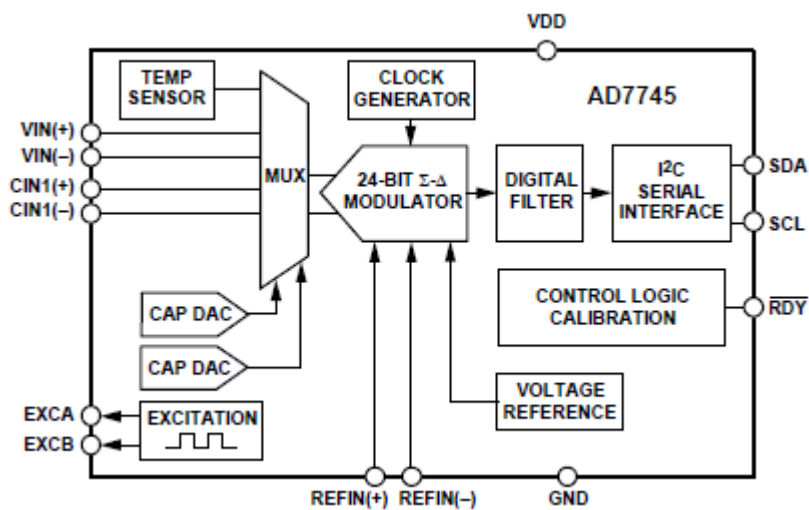
۸- خطی بودن 0.01%

۹- ولتاژ کاری 2.7 تا 5.25 ولت

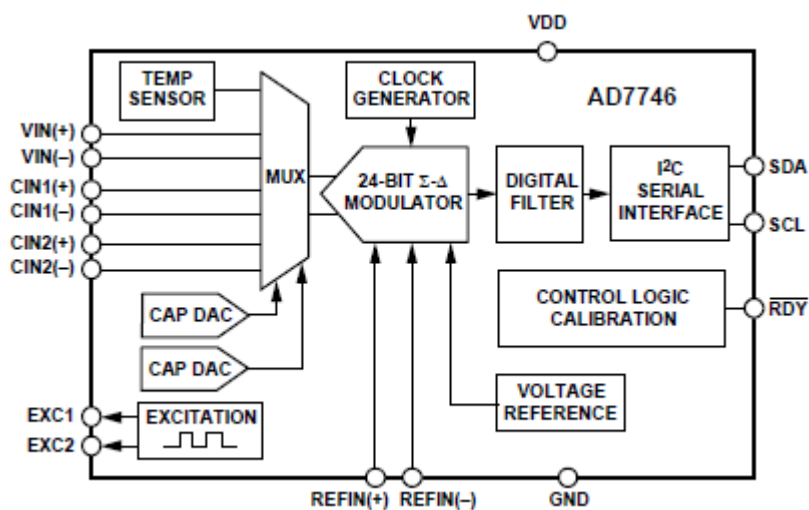
۱۰- دمای کار 40 - تا 125 درجه سانتی‌گراد

۱۱- جریان مصرفی 0.7mA

همانطور که در شکل (۱-۳) و شکل (۲-۳) نشان داده شده است، این مدار مجتمع شامل حسگر دمای داخلی، مرجع ولتاژ و تولیدکننده کلاک می‌باشد.



شکل (۱-۳): AD4445

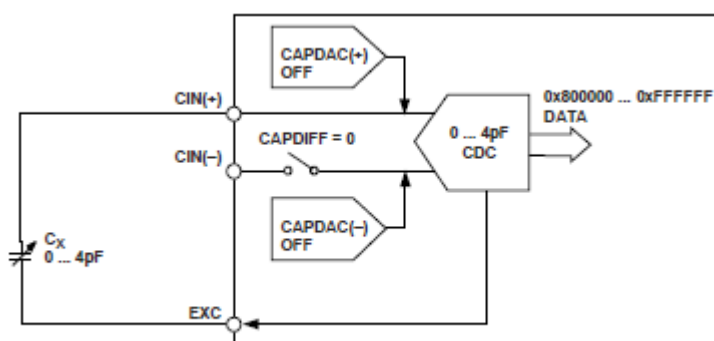


شکل (۲-۳): AD7746

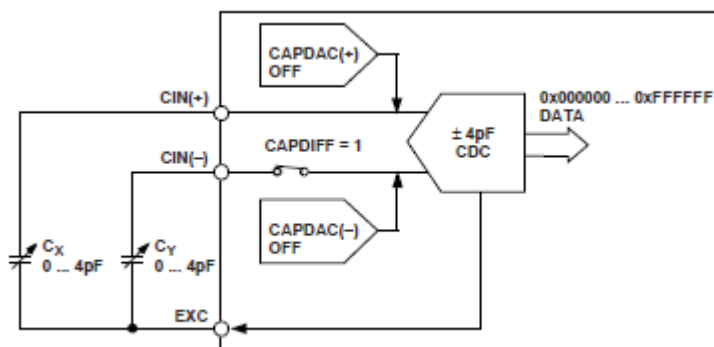
مدار مجتمع AD7745/46 دارای دو مد اندازه‌گیری، خازنی و ولتاژ/دما می‌باشد.

۳-۲-۱- مد خازنی

برای اندازه‌گیری ظرفیت خازن از این مد استفاده می‌گردد. ظرفیت خازنی در این مد به صورت تفاضلی و تک سر اندازه‌گیری می‌شود. در حالت تک سر ظرفیت خازن وصل شده بین پایه‌های CIN(+) و EXC را تعیین می‌کند (شکل (۳-۳)). در حالت تفاضلی، تفاوت ظرفیت خازنی بین خازن متصل به پایه‌های CIN(+) و EXC و خازن وصل شده بین پایه‌های CIN(-) و EXC اندازه‌گیری می‌شود، شکل (۴-۳).



شکل (۳-۳): مد خازنی و تک سر AD7745/46

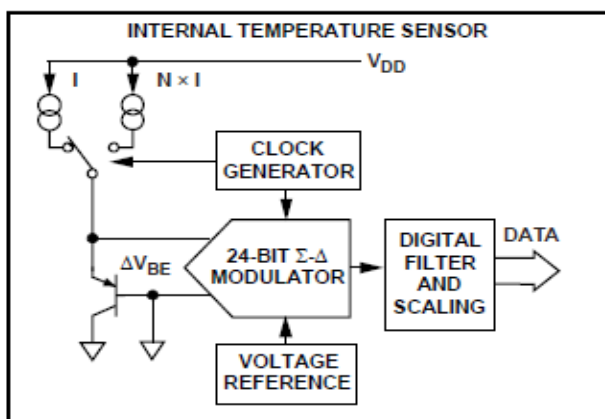


شکل (۴-۳): مد خازنی و تفاضلی ad7745/46

۳-۲-۲- مد ولتاژ/دما

این مد ولتاژ ورودی را اندازه‌گیری می‌کند یا به عنوان حسگر دما عمل می‌کند. حسگر دما به دو صورت حسگر دمای خارجی و داخلی می‌باشد.

حسگر داخلی با استفاده از اختلاف ولتاژ ΔV_{BE} یک ترانزیستور که در دو جریان متفاوت کار می‌کند، دما اندازه‌گیری می‌نماید (شکل (۳-۵)).



شکل (۳-۵): حسگر داخلی دما AD7745/46

رابطه بین تغییرات ولتاژ ΔV_{BE} با دما با توجه به معادله (۳-۱) به صورت خطی می‌باشد.

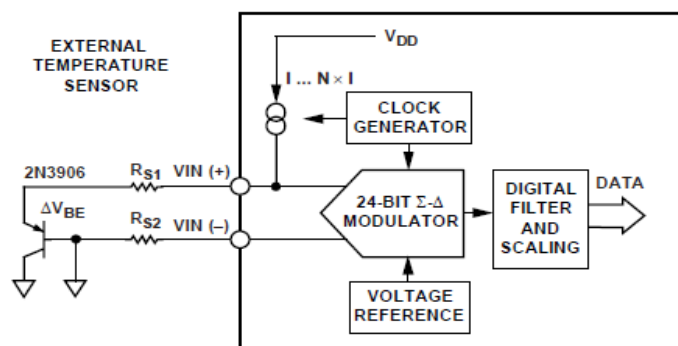
$$\Delta V_{BE} = (n_f) \frac{KT}{q} \times \ln(N) \quad (۳-۱)$$

K ثابت بولتزمن 1.38×10^{-23} ، T دمای مطلق برحسب کلوین، q بار الکترون برحسب کولن 1.6×10^{-19} ، N نسبت دو جریان و n_f عامل ایده‌آل دیود گرمایی است.

مدار مجتمع AD7745/46 برای اندازه‌گیری دما تراشه سیلیکونی از یک ترانزیستور داخل تراشه استفاده می‌کند. مبدل آنالوگ به دیجیتال $\Sigma - \Delta$ ولتاژ ΔV_{BE} را به دیجیتال تبدیل می‌کند. داده حاصل با استفاده از ضریب کالیبراسیون کارخانه مقیاس می‌شود، در نهایت با استفاده از معادله (۳-۲)، کد خروجی به دما مرتبط می‌گردد.

$$Temperature(^{\circ}C) = \frac{Code}{2048} - 4096 \quad (2-3)$$

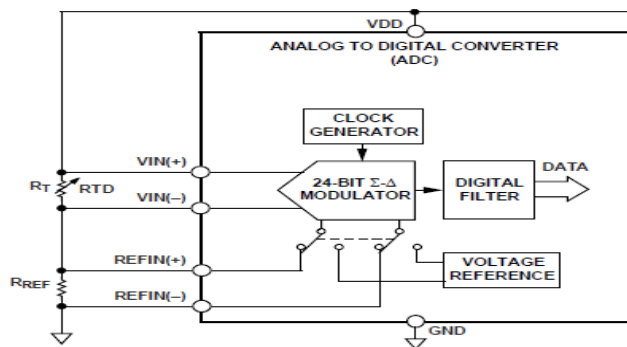
حسگر دمای خارجی در مدار مجتمع AD7745/46 از یک ترانزیستور خارجی برای اندازه‌گیری دما استفاده می‌کند، که در شکل (۶-۳) نشان داده شده است.



شکل (۶-۳): حسگر خارجی دما AD7745/46

تعیین دما در این حسگر مشابه با حسگر دمای داخلی، بر مبنای روش ΔV_{BE} است. تفاوت آنها در استفاده از ترانزیستور خارجی برای اندازه‌گیری دما می‌باشد. برای عملکرد مناسب حسگر دمای خارجی VIN(-) باید زمین شود. مجموع مقاومت سری $(R_{S1} + R_{S2})$ حدود ۱۰۰ اهم می‌باشد. مدار مجتمع AD7745/46 برای ترانزیستور 2N3906 با $n_f = 1/0.08$ کالیبره شده است.

برای تعیین ولتاژ با دقت بالا می‌توان از مدار مجتمع AD7745/46 استفاده نمود. در تعیین ولتاژ می‌توان از مرجع ولتاژ داخلی تراشه (۱/۱۷ V) یا مرجع ولتاژ خارجی بهره برد (شکل (۷-۳)).



شکل (۷-۳): مد ولتاژ AD7745/46

تعیین هر کدام از مدهای بیان شده برای AD7745/46 به صورت نرم افزاری انجام می‌شود.

۳-۳- توصیف ثبات‌های AD7745/46

Master می‌تواند در تمام ثبات‌های AD7745/46 عملیات خواندن یا نوشتن را انجام دهد. جدول

(۱-۳) ثبات‌های مدار مجتمع AD7745/46 را نشان می‌دهد.

جدول (۱-۳): ثبات‌های کلی AD7745/46

	آدرس اشاره‌گر		R/ W	بیت ۷	بیت ۶	بیت ۵	بیت ۴	بیت ۳	بیت ۲	بیت ۱	بیت ۰
ثبات	دسیما ل	هگزمال		مقدار پیش‌فرض							
Status	۰	0x01	R	-	-	-	-	EXC ERR	RDY	RDY VT	RDY CAP
				۰	۰	۰	۰	۰	۱	۱	۱
CAP Data H	۱	0x01	R	بایت با ارزش داده مد خازنی، 0x00							
CAP Data M	۲	0x02	R	بایت میانی داده مد خازنی، 0x00							
CAP Data L	۳	0x03	R	بایت کم ارزش داده مد خازنی، 0x00							

VT Data H	۴	0x04	R	بایت با ارزش داده مد ولتاژ/دما، 0x00							
VT Data M	۵	0x05	R	بایت میانی داده مد ولتاژ/دما، 0x00							
VT Data L	۶	0x06	R	بایت کم ارزش داده مد ولتاژ/دما، 0x00							
Cap Setup	۷	0x07	R/W	CAPE N	CIN 2	CAP DIFF	-	-	-	-	CAP CHO P
			
VT Setup	۸	0x08	R/W	VTEN	VT MD1	VTM D0	EXT REF	-	-	VTS HOR T	VTC HOP
EXC Setup	۹	0x09	R/W	CLKC TRL	EXC ON	EXC B	$\overline{\text{EXCB}}$	EXC A	$\overline{\text{EXCA}}$	EXC LVL 1	EXC LVL 0
				.	.	.	.	.	.	۱	۱
Config uration	۱۰	0x0A	R/W	VTFS 1	VTF S0	CAPF S2	CAP FS1	CAP FS0	MD2	MD1	MD0
				۱	.	۱	.	.	.	.	.
CAP DAC A	۱۱	0x0B	R/W	DAC AENA	DACA-7 Bit Value						
				.	0x00						
CAP DAC B	۱۲	0x0C	R/W	DAC AENA	DACA-7 Bit Value						
				.	0x00						
CAP Offset H	۱۳	0x0D	R/W	بایت با ارزش کالیبراسیون آفست خازنی، 0x80							
CAP Offset L	۱۴	0x0E	R/W	بایت کم ارزش کالیبراسیون آفست خازنی، 0x00							
CAP Gain H	۱۵	0x0F	R/W	بایت با ارزش کالیبراسیون بهره خازنی، کالیبره شده کارخانه							
CAP Gain L	۱۶	0x10	R/W	بایت کم ارزش کالیبراسیون بهره خازنی، کالیبره شده کارخانه							
Volt Gain H	۱۷	0x11	R/W	بایت با ارزش کالیبراسیون بهره ولتاژ، کالیبره شده کارخانه							
Volt Gain L	۱۸	0x12	R/W	بایت کم ارزش کالیبراسیون بهره ولتاژ، کالیبره شده کارخانه							

۳-۴- طرز کار AD7745/46

برای اندازه‌گیری در حسگرهای خازنی باید خازن با ولتاژ یا جریان تحریک شود. به طور کلی سیگنال محرک می‌تواند هر نوع شکل موجی باشد. معمولاً از موج‌های سینوسی و مربعی استفاده می‌شود. بنابراین باید سامانه اندازه‌گیری خازنی با محرک‌های موج سینوسی و موج مربعی با هم مقایسه شوند.

سامانه اندازه‌گیری خازنی بر مبنای محرک موج سینوسی وضوح بالا دارد اما بهینه کردن قیمت و توان و بیشینه کردن انعطاف پذیری آن دشوار می‌باشد. بنابراین روی سامانه اندازه‌گیری خازنی با محرک مربعی تمرکز شده است. برای پیاده‌سازی آن می‌توان از مدارهای کلید خازنی^۱ استفاده نمود. بخاطر اینکه مدارهای کلید خازنی با کلید و خازن‌ها کار می‌کنند، فناوری CMOS برای پیاده‌سازی آن بسیار مناسب می‌باشد. به علاوه پیچیدگی و اتلاف توان مدارهای کلید خازنی پایین است.

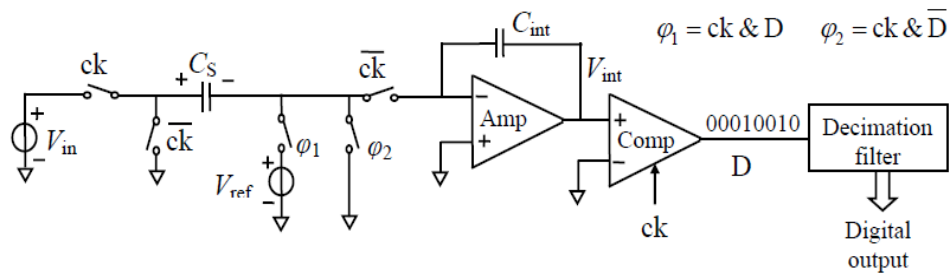
برای تبدیل آنالوگ به دیجیتال^۲ می‌توان از اصول تبدیل غیرمستقیم استفاده نمود. روش مبدل سیگما-دلتا یک تبدیل کننده‌ی غیرمستقیم است، که به طور رایج برای تبدیل آنالوگ به دیجیتال استفاده می‌شود [۴۹].

۳-۴-۱- اندازه‌گیری خازنی بر مبنای سیگما-دلتا

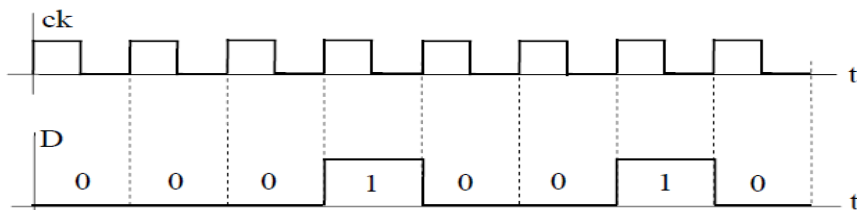
شکل (۳-۸) نمودار پایه یک مبدل سیگما-دلتا را نشان می‌دهد.

¹ Switched-Capacitor(SC)

² Analog-to- Digital



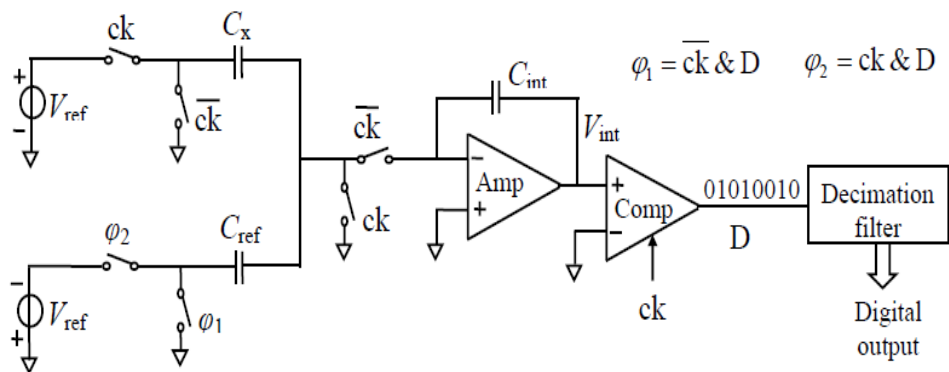
شکل (۳-۸): نمودار پایه سیگما-دلتا



شکل (۳-۹): نمایش کلاک و خروجی برای مبدل سیگما-دلتا

برای درک چگونگی کار مدار، فرض می‌شود که در $t=0$ ، خروجی انتگرالگیر منفی است و $V_{ref} > V_{in}$. در نتیجه ولتاژ خروجی مقایسه کننده در تناوب اول کلاک صفر است (شکل (۳-۹)). در طول این تناوب، خازن نمونه بردار C_s تا V_{in} شارژ می‌شود. روی لبه پایین رونده، بار خازن نمونه‌گیر به خازن انتگرال‌گیر C_{int} منتقل می‌شود و ولتاژ خروجی انتگرال‌گیر با جهش به مقدار $C_s \frac{V_{in}}{C_{int}}$ افزایش می‌یابد. تا زمانی که خروجی انتگرال‌گیر منفی باشد این فرآیند تکرار می‌شود. در نهایت مقدار خروجی انتگرال‌گیر به سطح مثبت می‌رسد. هنگامی که خروجی انتگرال‌گیر مثبت شد، بار $C_s(V_{in} - V_{ref})$ به C_{int} منتقل می‌گردد. با توجه به فرض $(V_{in} < V_{ref})$ ولتاژ خروجی انتگرال‌گیر منفی می‌شود. به خاطر اینکه مقدار بار منتقل شده به وسیله V_{ref} و V_{in} در نهایت با همدیگر خنثی می‌گردد، در یک دنباله طولانی از صفر و یک‌ها، نسبت تعداد یک‌ها به تعداد کل تناوب کلاک برابر با نسبت $\frac{V_{in}}{V_{ref}}$ می‌باشد. فیلتر دسیمال این مقدار را استخراج می‌کند.

با اصلاح ساده، مبدل ولتاژ به دیجیتال^۱ در شکل (۳-۸) می‌تواند به عنوان مبدل خازنی^۲ به دیجیتال استفاده گردد. مدار اصلاح شده در شکل (۳-۱۰) نشان داده شده است.



شکل (۳-۱۰): مبدل خازن به دیجیتال

هنگامی که خروجی مقایسه کننده صفر باشد، بار $C_x V_{ref}$ به C_{int} منتقل می‌شود و وقتی خروجی مقایسه کننده یک باشد، بار $V_{ref}(C_x - C_{ref})$ به C_{int} منتقل می‌گردد. بخاطر با متعادل در ورودی انتگرال گیر، در یک دنباله از صفر و یک‌ها، نسبت تعداد یک‌ها به تعداد کل تناوب کلاک برابر با نسبت $\frac{C_x}{C_{ref}}$ می‌باشد. این قاعده کلی در تراشه‌های AD7745/46، AD7747 و AD7150 شرکت Analog Devices استفاده می‌شود [۴۹].

۳-۵- ارتباط AD7745/46 با میکرو

به طور سنتی، برای تبدیل خازن به دیجیتال ابتدا سیگنال خازنی به سیگنال ولتاژ تبدیل می‌شود و سپس با استفاده از یک مبدل آنالوگ به دیجیتال دقت بالا سیگنال ولتاژ به سیگنال دیجیتال تبدیل می‌گردد. همگام با پیشرفت فناوری‌های الکترونیکی، تراشه‌های مجتمع جایگزین قطعات الکترونیکی گسسته شدند.

¹ Voltage-to- digital converter (VDC)

² Capacitance-to-digital (CDC)

از این رو برای تبدیل سیگنال خازنی به سیگنال دیجیتال از مدار مجتمع AD7745/46 استفاده می‌گردد. این تراشه الکترونیکی قابلیت تبدیل خازن به دیجیتال با وضوح ۲۴ بیت را دارا می‌باشد. ویژگی دیگر آن دقت (۴fF) می‌باشد. ولتاژ کاری آن ۲/۷ تا ۵/۲۵ ولت است. این تراشه از پروتکل ارتباطی TWI^۱ پیروی می‌کند. این واسط از طریق دو سیم SDA و SCL که اولی برای انتقال اطلاعات و دومی برای انتقال پالس ساعت، با وسایل جانبی ارتباط برقرار می‌کند. برای کنترل AD7746 با ارتباط دوسیمه TWI نیاز به یک ریز واپایش‌گر می‌باشد. ریز واپایش‌گر مورد استفاده در این پایان‌نامه ATmega16L از خانواده AVR می‌باشد که قابلیت ارتباط با پروتکل سریال دوسیمه را داراست و ولتاژ کاری آن ۲/۷ تا ۵/۵ ولت می‌باشد. توان مصرفی پایین، عملکرد بالا و دسترسی آسان آن دلایل استفاده این ریز واپایش‌گر می‌باشد.

۳-۶- AVR

امروزه با پیشرفت روزافزون علم الکترونیک و دیجیتال، استفاده از ریز واپایش‌گرها در ساخت تجهیزات الکترونیکی مانند تجهیزات صنعتی و پزشکی با رشد بسیار بالایی همراه بوده است. ریز واپایش‌ها بیشتر برای پردازش داده‌های یک سیستم صنعتی و کنترل یک فرآیند استفاده می‌شوند. از ریز واپایش‌گرهای پرکاربرد در صنعت می‌توان به سری ریز واپایش‌گرهای AVR، PIC و ARM اشاره کرد.

ریز واپایش‌گرهای AVR یکی از انواع ریز واپایش‌گرها هستند که به علت امکانات مناسب و سادگی کار آنها و همچنین قیمت مناسب کاربردهای فراوانی پیدا کرده‌اند. AVRها، ریز واپایش‌گرهای هشت بیتی از نوع CMOS با توان مصرفی پایین هستند که براساس ساختار پیشرفته RISC ساخته شده‌اند. پس از ساخت اولین نمونه‌های AVR توسط شرکت Atmel در سال ۱۹۹۶، این نوع از ریز واپایش‌گرها توانست نظر علاقه‌مندان به الکترونیک را به خود جذب کند، به طوری که امروزه یکی از پرمصرف‌ترین انواع

^۱ Two-Wire serial Interface

ریزواپایش گرها به حساب می آید. نمی توان هیچ نوع میکروکنترلی را به عنوان بهترین معرفی کرد چرا که هر نوع میکروکنترلر کاربردهای خاص خود را دارد و براساس خصوصیات داخلی می تواند تنها برای موارد ویژه ای به عنوان بهترین انتخاب گردد.

AVRها، با ساختار RISC، دستورات را تنها در یک پالس ساعت اجرا می نمایند و به این ترتیب می توان تا به ازای هر یک مگا هرتز، یک مگا دستور را در ثانیه اجرا کرده و برنامه را از لحاظ سرعت پردازش و نیز مصرف توان بهینه نمود.

AVRها، دارای ۳۲ ثبات همه منظوره و مجموعه دستورات قدرتمندی می باشند. تمامی این ۳۲ ثبات مستقیماً به ALU متصل شده اند. بنابراین دسترسی به دو ثبات در یک تناوب ساعت هم امکان پذیر است. این ساختار موجب می گردد تا سرعت آن نسبت به ریزواپایش گرهای CISC تا ۱۰ برابر هم افزایش یابد.

خانواده ریزواپایش گرهای AVR، تراشه هایی پیشرفته با امکانات جانبی کامل هستند و به سه دسته تقسیم می شوند:

۱- Tiny AVR (ATtiny)

۲- Classic AVR (AT90S)

۳- Mega AVR (ATmega)

تفاوت بین این سه نوع مربوط به امکانات موجود در آنها می باشد. تعداد پایه ها و مجموعه دستورات Tiny AVRها غالباً از Mega AVRها کمتر می باشند و به عبارتی از لحاظ پیچیدگی حداقل امکانات را دارند. Mega AVRها حداکثر امکانات را دارند و Classic AVRها جایی بین این دو نوع قرار می گیرند. البته از آنجایی که بین سه دسته Classic AVRها، قبل از دو گروه دیگر تولید شده اند، امروزه در

طراحی‌های جدید کمتر از آنها استفاده می‌شود و عملاً هر یک از آنها با تراشه‌ای از گروه Mega AVR یا Tiny جایگزین شده‌اند.

در انتهای اسم بعضی از ریزوآپایش‌گرها پسوندی وجود دارد (مثل ATmega16L و ATmega16). تفاوت تراشه‌هایی که تنها پسوند اسمی آنها با هم فرق دارند، در میزان قابل قبول برای ولتاژ تغذیه و محدوده‌ی مجاز فرکانسی کریستال مورد استفاده می‌باشد. پسوندهای L و V را می‌توان به ترتیب، مخفف عبارت‌های Low Power و Very Low Power دانست.

۳-۷- ویژگی‌های ATmega16L

مدار مجتمع ATmega16L یک میکروکنترلر AVR است که توسط شرکت Atmel ارائه شده است. برخی از ویژگی‌های این مدار مجتمع در زیر آورده شده است.

۱- دارای ۱۳۱ دستور قدرتمند است که اکثر آنها در یک تناوب ساعت اجرا می‌شوند.

۲- ۱۶ کیلو بایت حافظه Flash قابل برنامه‌ریزی دارد.

۳- دارای ۵۱۲ بایت حافظه EEPROM داخلی می‌باشد.

۴- دارای ۱ کیلو بایت حافظه SRAM داخلی است.

۵- از پروتکل ارتباط سریال دو سیمه (Two Wire) پیروی می‌کند.

۶- USART سریال قابل برنامه‌ریزی

۷- ارتباط سریال SPI

۸- ولتاژ عملیاتی ۲/۷ تا ۵/۵ ولت و فرکانس کاری ۰ تا ۸ مگا هرتز

۳-۸- ارتباط دو سیمه

رابط سریال دوسیمه (Two Wire Serial Interface) که در برخی مواقع به آن رابط I2C نیز می‌گویند) در واقع رابط I2C یک پروتکل ارتباطی TWI است) اولین بار توسط شرکت فیلیپس^۱ در اوایل دهه ۱۹۸۰ طراحی شد. در ابتدا این پروتکل به منظور ایجاد روشی ساده برای ایجاد ارتباط پردازنده با تراشه‌های جانبی در یک دستگاه تلویزیون ابداع شد. امروزه این پروتکل به صورت عمومی در صنعت پذیرفته شده است و کاربرد آن از سطح تجهیزات صوتی و تصویری نیز فراتر رفته است. به گونه‌ای که امروزه در بیش از ۱۰۰۰ نوع IC مختلف به کار گرفته شده است. I2C باعث کاهش چشم‌گیر هزینه‌ی نهایی می‌شود. دو خط ارتباطی باعث کوچک شدن برد مدار چاپی و عیب‌یابی سریع‌تر می‌شود.

در ارتباط دوسیمه، Master وسیله‌ای است که شروع‌کننده ارسال اطلاعات و تولیدکننده پالس کلاک و پایان‌دهنده‌ی ارسال اطلاعات می‌باشد و Slave وسیله‌ای است که توسط Master آدرس‌دهی شده است. فرستنده وسیله‌ای است که اطلاعات را در باس داده قرار می‌دهد و گیرنده نیز وسیله‌ای است که اطلاعات را از باس می‌خواند.

برخی از ویژگی‌های باس I2C به شرح زیر می‌باشند:

۱. I2C یک پروتکل سریال سنکرون می‌باشد و کلاک آن می‌تواند بدون از دست رفتن اطلاعات تغییر کند.

^۱ Philips

۲. فضای آدرس هفت بیتی که می‌توان ۱۲۸ آدرس مختلف برای آدرس Slave در نظر گرفت و در ویرایش جدید این استاندارد، فضای آدرس دهی ۱۰ بیتی که می‌توان ۱۰۲۴ آدرس مختلف برای آدرس Slave در نظر گرفته شده است.
۳. رابطی انعطاف‌پذیر و بسیار ساده و در عین حال قدرتمند که فقط نیاز به دو خط انتقال SDA و SCL دارد. بر روی SCL توسط Master کلاک ایجاد می‌شود و SDA خط Data دوطرفه می‌باشد که جهت آن توسط Master کنترل می‌شود.
۴. قابلیت پشتیبانی از مدهای Master و Slave در حالت‌های فرستنده و گیرنده داراست.
۵. با این ارتباط می‌توان تعدادی Master را کنترل نمود (Multi Master).
۶. بر روی باس ۸ بیتی به صورت دوجهته با نرخ ارسال حداکثر ۴۰۰ کیلوبیت بر ثانیه و ۳.۴ مگا بیت بر ثانیه در وضعیت High Speed را دارد.
۷. عدم نیاز به طراحی مدار واسط و راه‌اندازی باس تنها با دو مقاومت زیرا که مدل کنترل باس به صورت مجتمع بر روی وسیله‌ی I2C قرار می‌گیرد.
۸. قابلیت فراخوانی عمومی که توسط Master انجام می‌شود.

۳-۸-۱- بررسی گذرگاه ارتباط دوسیمه

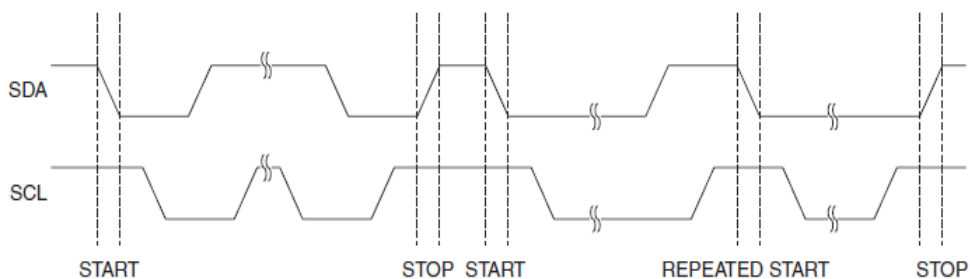
ارتباط سریال دوسیمه یکی از کاربردهای نوعی ریزوآپایش‌گرها است. با این ارتباط می‌توان تا ۱۲۸ دستگاه مختلف را از طریق دو خط گذرگاه با هم شبکه‌بندی کرد. یکی از این خطوط برای پالس ساعت (SCL) و دیگری برای داده (SDA) می‌باشد. هر یک از خطوط (SCL, SDA) از خارج با یک مقاومت بالاکش (Pullup) به منبع تغذیه متصل می‌شوند. به منظور جلوگیری از تداخل دستگاه‌ها با هم، به هر دستگاه یک آدرس منحصر به فرد (۰ تا ۱۲۷) اختصاص می‌یابد.

۳-۸-۲- روش ارسال داده

برای ارسال داده، فرستنده اصلی بیت‌ها را به ترتیب از بارزش‌ترین بیت (MSB) تا کم‌ارزش‌ترین بیت (LSB) روی خط داده قرار می‌دهد، سپس با ایجاد پالس ساعت روی خط SCL داده‌های انتقال می‌یابند.

۳-۸-۲-۱- وضعیت‌های start و stop

در پروتکل رابط سریال دوسیمه وضعیت‌های start و stop توسط Master روی خطوط گذرگاه ایجاد می‌شود، زمانیکه قصد ارسال داده داشته باشد وضعیت start و وقتی قصد توقف داشته باشد stop را ایجاد می‌کند. وقتی که مابین start و stop دوباره start ایجاد شود یک مورد خاص اتفاق می‌افتد و مجدداً به وضعیت start بازمی‌گردد. از این حالت از زمانی استفاده می‌شود که Master قصد دارد بدون آزاد شدن گذرگاه، داده جدیدی را ارسال کند. بعد از start دوباره، گذرگاه اشغال می‌ماند تا stop بعدی ایجاد شود که این حالت دقیقاً مشابه رفتار start می‌باشد. هنگامی که SDA از high-to-low تغییر کند و SCL در سطح high ثابت بماند، موقعیت start رخ می‌دهد و وقتی که SDA از low-to-high تغییر کند و SCL در سطح high ثابت بماند، موقعیت stop رخ می‌دهد (شکل (۳-۱۱)).



شکل (۳-۱۱): وضعیت start و stop

۳-۸-۲-۲- قالب بندی آدرس

در این قالب بندی، بسته های آدرس ۹ بیتی می باشند که بر روی گذرگاه (TWI) ارسال می شوند. این ۹ بیت تشکیل شده است از ۷ بیت آدرس بعلاوه یک بیت کنترل Read یا Write (SLA+W) یا (SLA+R) و یک بیت به نام ACK که گیرنده برای فرستنده ارسال می کند تا مشخص شود کد آدرس، دریافت شده است. اگر بیت مربوط به R/W یک شده باشد، عملکرد Read و در غیر این صورت عملکرد Write اجرا می شود. زمانی که Slave آدرس خود را تشخیص داد باید بیت ACK را ارسال کند. که این کار را با پایین بردن خط SDA در نهمین تناوب SCL انجام می دهد. اگر Slave مشغول باشد یا به هر دلیلی نتواند سرویس های درخواستی Master را پاسخ دهد، باید در زمان ارسال ACK خط SDA در وضعیت high نگه داشته شود. در این موقع Master می تواند عمل ارسال را متوقف کرده یا دوباره برای ارسال مجدد start کند.

۳-۲-۸-۳- قالب بندی بسته های اطلاعات

بسته های اطلاعات ارسالی در این پروتکل ۹ بیتی بوده که این ۹ بیت، شامل بایت داده و یک بیت ACK است. در طول ارسال داده، Master پالس ساعت و وضعیت های start و stop را تولید می کند. وقتی که گیرنده اطلاعات را دریافت نمود، بیت ACK را با Low نمودن خط SDA در نهمین تناوب SCL ارسال می کند. زمانی که گیرنده در هنگام دریافت داده دچار مشکل شد، یا نتوانست داده های بعدی را دریافت کند، باید با ایجاد NACK (بالا بردن خط SDA در نهمین تناوب SCL) فرستنده را مطلع کند. در این قالب بندی اولین بیت ارسالی داده، بیت MSB می باشد.

۳-۹- ارتباط سریال USART

ارسال کننده و دریافت کننده همزمان و غیرهمزمان (USART) در ریزواریش گره های AVR دارای ویژگی های زیر می باشد:

۱. عملکرد کاملاً دوطرفه: در این عملکرد، اطلاعات در یک لحظه در هر دو جهت انتقال می یابد، به طور کلی که اگر پایه RXD از میکروکنترلر در حال دریافت داده سریال باشد در همین زمان نیز یک داده سریال را می توان از پایه TXD ارسال نمود، زیرا در ثباتهای مربوط به دریافت و ارسال کاملاً از یکدیگر مجزا هستند و به صورت مستقل عمل می نمایند و قدرت ما را در استفاده از رابط سریال بیشتر می کنند.

۲. عملکرد سریال به صورت سنکرون و آسنکرون

۳. عملکرد سنکرون در دو مد Master و Slave

۴. پشتیبانی از قالب‌های داده ۵، ۶، ۷، ۸ و یا ۹ بی‌تی و نیز یک یا دو بیت توقف که به صورت اختیاری انتخاب می‌گردد.

۵. مولد بیت توازن زوج یا فرد و بررسی بیت توازن و تست آن توسط سخت افزار

۶. آشکارسازی خطای قالب‌بندی

۷. حالت ارتباطی غیرهمزمان با سرعت دو برابر [۵۰]

۳-۱۰- اندازه ظرفیت خازنی

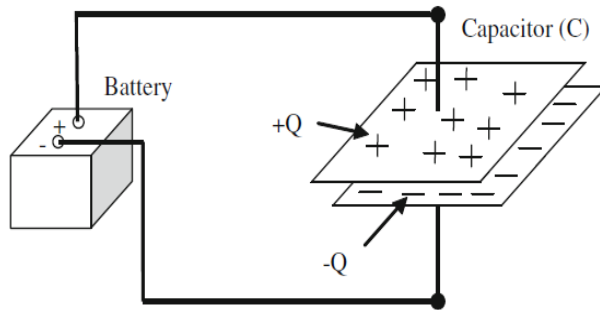
حسگرهای خازنی می‌تواند کمیت‌های دی‌الکتریک، جنبش و ترکیب شیمیایی را به طور مستقیم اندازه‌گیری کند و متغیرهایی که بتوان به جنبش و ثابت دی‌الکتریک تبدیل کرد مانند فشار، شتاب و سطح سیال را به طور غیرمستقیم اندازه‌گیری می‌کند.

جوشن‌های حسگر خازنی در ساختار و اشکال متفاوتی وجود دارند. میدان الکتریکی بین جوشن‌ها در حسگر خازنی تحت تاثیر هندسه آنها می‌باشد. برای مثال، خازن بین دو میله فلزی با خازن بین دو صفحه موازی تفاوت دارد بخاطر اینکه ماهیت میدان الکتریکی در اطراف جسم باردار متفاوت می‌باشد. جوشن‌های صفحه‌ای مستطیلی، میله‌های استوانه‌ای، صفحه‌های موازی، و لوله‌ای استوانه‌ای و خازن‌های چند صفحه‌ای چند نمونه از جوشن‌های حسگر خازنی می‌باشند.

۳-۱۰-۱- صفحه‌های موازی

ساده‌ترین شکل جوشن‌ها دو صفحه موازی می‌باشد (شکل (۳-۱۲)). همان طور که معادله

(۳-۳) نشان می‌دهد، ظرفیت خازنی آن وابسته به هندسه و ثابت دی‌الکتریک است:



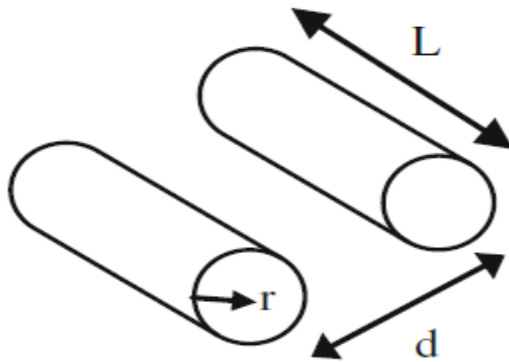
شکل (۳-۱۲): خازن صفحه‌ای

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{d} \quad (۳-۳)$$

که C ظرفیت خازن برحسب فاراد (F)، ϵ_r ثابت دی‌الکتریک ماده بین میله‌ها، ϵ_0 گذردهی خلاء که برابرست با $8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ ، d فاصله دو صفحه برحسب متر و A سطح صفحه‌ها بر حسب مترمربع می‌باشد.

۳-۱۰-۲ - میله استوانه‌ای

میله‌های استوانه‌ای از هادی ساخته شده‌اند به طوری که باهای منفی در جوشن منفی و بارهای مثبت در دی‌الکتریک مثبت ذخیره می‌شود. در صورتی که بین دو جوشن ولتاژ اعمال گردد، میدان الکتریکی بین آنها ایجاد می‌شود. دو میله استوانه‌ای را نشان می‌دهد که در فاصله d از هم قرار دارند. خازن بین دو میله موازی با معادله‌های (۳-۴) و (۳-۵) تعیین می‌شود.



شکل (۳-۱۳): خازن میله استوانه‌ای

$$C = \frac{\pi \epsilon_0 \epsilon_r}{\ln \frac{d}{r}} L \quad d \gg r \quad (۴-۳)$$

$$C = \frac{\pi \epsilon_0 \epsilon_r}{\ln \left(\frac{d + \sqrt{d^2 - 4r^2}}{2r} \right)} L \quad d \ll r \quad (۵-۳)$$

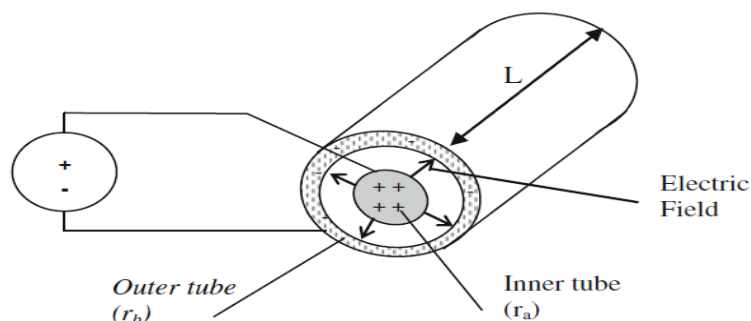
که C ظرفیت خازن برحسب فاراد (F)، ϵ_r ثابت دی‌الکتریک ماده بین میله‌ها، ϵ_0 گذردهی خلاء که برابرست با $8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ ، L طول استوانه برحسب متر، d فاصله دو میله برحسب متر و r شعاع استوانه بر حسب متر می‌باشد.

۳-۱۰-۳ - لوله استوانه‌ای

جوشن بر مبنای لوله استوانه‌ای معمولاً برای حسگر خازنی لوله‌ای استفاده می‌شود. مایر^۱ از این روش برای تعیین سطح سوخت در مخازن سوخت هواپیما استفاده نمود. شکل (۳-۱۴) یک خازن لوله استوانه‌ای را نشان می‌دهد. خازن استوانه‌ای شامل دو لوله استوانه‌ای درونی و بیرونی می‌باشد. استوانه‌ای درونی می‌تواند

¹ Maier

به پایانه مثبت و استوانه‌ای بیرونی می‌تواند به پایانه مثبت وصل شوند. در صورتی که ولتاژ به دو سر پایانه وصل شود، میدان الکتریکی در وسط دو استوانه ایجاد می‌گردد. اگر r_b و r_a به ترتیب شعاع استوانه‌ای داخلی و خارجی باشند، ظرفیت خازن بر حسب فاراد با استفاده از معادله (۶-۳) محاسبه می‌گردد.



شکل (۳-۱۴): خازن لوله استوانه‌ای

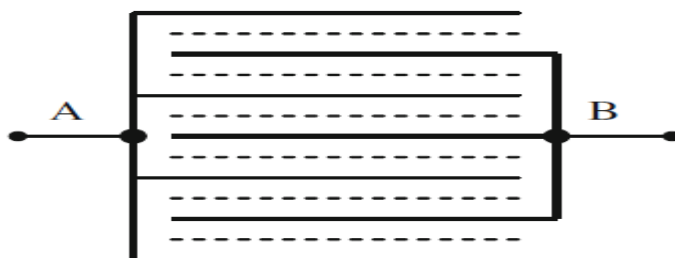
$$C = \frac{\pi \epsilon_0 \epsilon_r}{\ln \frac{r_b}{r_a}} L \quad (۶-۳)$$

۳-۱۰-۴ - خازن‌های چند صفحه‌ای

خازن‌های چند صفحه‌ای می‌تواند در سامانه‌های اندازه‌گیری سطح سیال خازنی استفاده گردد. افزایش ظرفیت خازنی یکی از مزایای خازن‌های چند صفحه‌ای می‌باشد.

در صورتی که خازن از n صفحه‌ی موازی تشکیل شده باشد (شکل (۳-۱۵)). همان‌طور که در

معادله (۷-۳) نشان داده شده است، ظرفیت خازن $n-1$ برابر می‌گردد.



شکل (۳-۱۵): خازن چند صفحه‌ای

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r (n - 1) A}{d} \quad (۷-۳)$$

که C ظرفیت خازن بر حسب فاراد (F)، ϵ_r ثابت دی‌الکتریک ماده بین میله‌ها، ϵ_0 گذردهی خلاء که برابرست با $۸/۸۵۴ \times ۱۰^{-۱۲} \text{ F/m}$ ، d فاصله دو صفحه بر حسب متر، A سطح صفحه‌ها بر حسب مترمربع و n تعداد صفحات موازی می‌باشد.

فصل چهارم: سامانه سخت افزاری و نرم

افزاری

۴-۱- پیشگفتار

در این فصل یک سامانه اندازه‌گیری رطوبت خاک طراحی شده است. برای پیاده‌سازی این سامانه اندازه‌گیری از مدار مجتمع AD7745/46 استفاده شده است. در ادامه به توضیح جزئیات این سامانه اندازه‌گیری رطوبت خاک می‌پردازیم.

۴-۲- سامانه اندازه‌گیری رطوبت خاک

با توجه به روش‌های بیان شده در فصل دوم، تعیین رطوبت خاک به صورت لحظه‌ای و بدون خطر سلامتی در محیط آزمایشگاه و مزارع کشاورزی بر مبنای روش خازنی می‌باشد. بنابراین در این پایان‌نامه از سامانه اندازه‌گیری رطوبت خاک بر اساس روش خازنی استفاده شده است. برای رسیدن به این مقصود از مدار مجتمع AD7745/46 استفاده گردید که مقدار خازن را با دقت بالا اندازه‌گیری می‌نماید. برای کنترل AD7775/46 نیاز به یک ریزواپایش گر با قابلیت ارتباط با پروتکل سریال دوسیمه می‌باشد. ریزواپایش گر مورد استفاده در این تحقیق ATmega16L از خانواده AVR است. برای نمایش اندازه‌گیری از LCD کاراکتری LM016 استفاده گردیده است. شکل (۴-۱) نمودار کلی سخت افزارهای مدار را نشان می‌دهد.



شکل (۴-۱): نمودار کلی سخت‌افزار و روند اندازه‌گیری رطوبت

۴-۳- مدار اندازه‌گیری رطوبت خاک

هدف این پایان نامه طراحی و پیاده‌سازی سامانه اندازه‌گیری رطوبت خاک می‌باشد. سامانه اندازه‌گیری از سه بخش مدار الکترونیکی، حسگر خازنی و نمایشگر تشکیل شده است. در ادامه این سه بخش توضیح داده می‌گردد.

۴-۳-۱- حسگر خازنی

با توجه به اینکه سامانه اندازه‌گیری رطوبت خاک پیشنهادی بر مبنای اندازه‌گیری ظرفیت خازن عمل می‌کند، در نتیجه باید از یک نوع حسگر استفاده نمود که مقدار رطوبت خاک را به ظرفیت خازنی مرتبط کند. بنابراین از یک حسگر خازنی استفاده شده است.

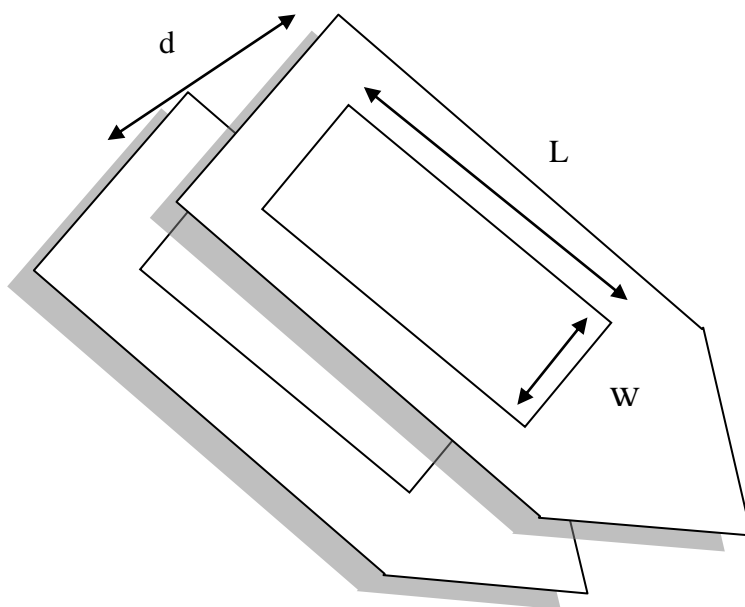
در مواد ترکیبی مثل خاک (که از اجزاء مختلفی مانند مواد معدنی، هوا و آب تشکیل شده است)، مقدار ثابت دی‌الکتریک متناسب با توزیع هریک از اجزاء می‌باشد. به طوری که بین ثابت دی‌الکتریک خاک خشک (۲ تا ۵) و آب خالص (۸۱) اختلاف زیادی وجود دارد. در نتیجه با تغییر رطوبت موجود در خاک، ثابت دی‌الکتریک تغییر می‌کند. در صورتی که یک حسگر خازنی درون خاک قرار بگیرد به طوری که دی‌الکتریک آن خاک باشد، ظرفیت خازنی این حسگر با تغییر رطوبت خاک تغییر می‌کند.

حسگرهای خازنی مختلفی وجود دارد که تفاوت آنها در هندسه جوشن‌ها حسگر می‌باشد. در این سیستم اندازه‌گیری از حسگرهای خازنی میله استوانه‌ای و صفحه‌های موازی استفاده گردیده است. به طوریکه ابعاد حسگر خازنی میله استوانه‌ای به صورت تجربی به دست آمده است.

۴-۳-۱-۱ - طراحی حسگر خازنی صفحه‌های موازی

ظرفیت خازنی حسگر خازنی از معادله (۱-۴) بدست می‌آید (شکل (۲-۴)). این حسگرها در حالت عادی بسته به طول، عرض صفحه خازنی و فاصله دو صفحه از یکدیگر دارای یک ظرفیت خازنی معین می‌باشند (ماده بین صفحه‌های خازنی هوا است). با فرو کردن حسگر در خاک (یا قرارگیری خاک بین صفحات خازن)، ثابت دی‌الکتریک خازن که قبلاً هوا بود، تغییر می‌کند و در نتیجه ظرفیت خازنی آن تغییر می‌کند.

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{d} = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{W \cdot L}{d} \quad (۱-۴)$$

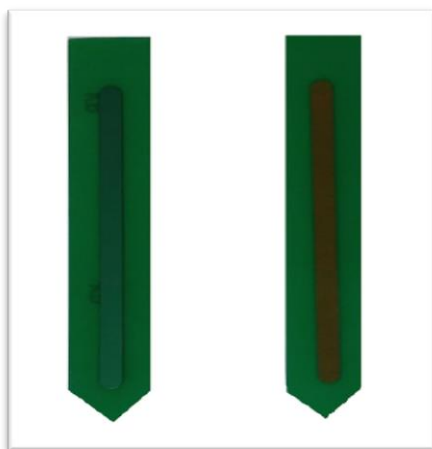


شکل (۲-۴): حسگر خازنی

برای طراحی حسگر خازنی فرض شده است که بیشینه اندازه‌گیری مدار مجتمع AD7745/46 مربوط به زمانی است که جوشن‌های حسگر در داخل آب قرار داشته باشند. در این حالت مقدار ثابت دی‌الکتریک برابر ۸۱ می‌باشد. بنابراین مقدار C ، ϵ_0 و ϵ_r معلوم می‌گردد و با توجه به (۱-۴) می‌توان نسبت A/d را

تعیین نمود. با نسبت دادن یک مقدار معین به یک از متغیرهای A و d ، متغیر دیگر نیز مشخص می‌گردد.

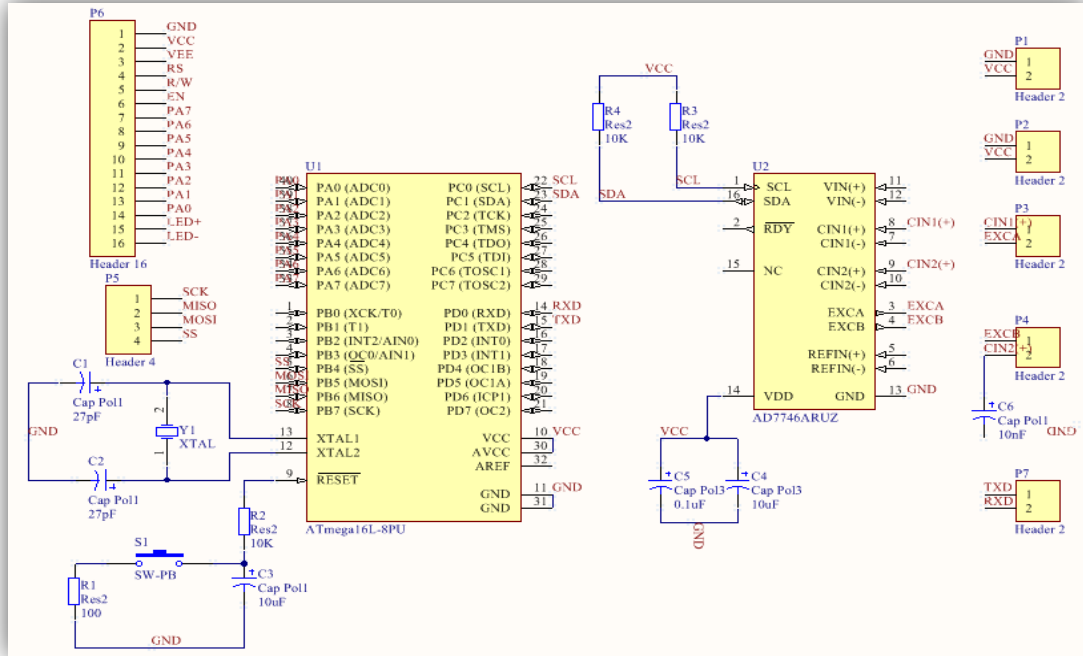
شکل (۳-۴) نمونه‌ای از حسگر صفحه‌ای طراحی شده را نشان می‌دهد.



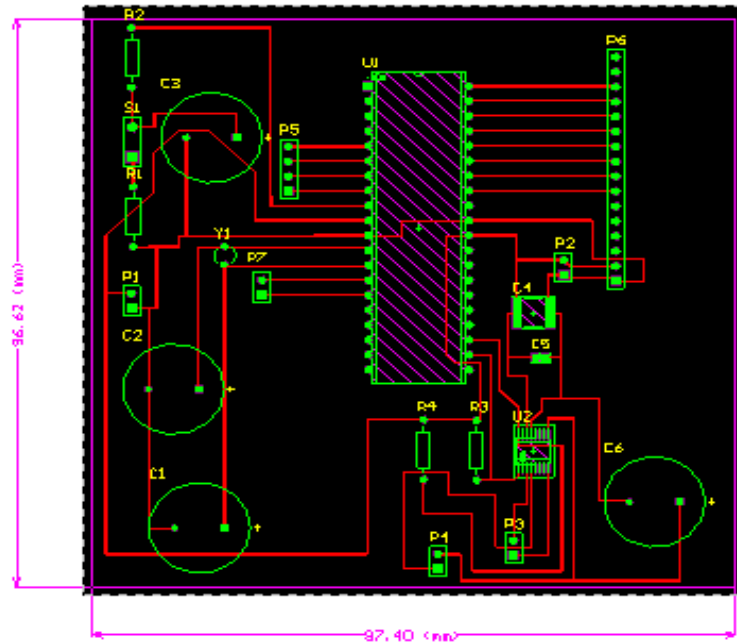
شکل (۳-۴): حسگر صفحه‌ای طراحی شده

۴-۳-۲- بخش الکترونیکی

ظرفیت خازنی حسگر به وسیله تراشه AD7745/46 اندازه‌گیری می‌شود. برای این منظور باید مدار مجتمع AD7745/46 در مد خازنی و تک سر تنظیم شود. ظرفیت خازنی به وسیله این تراشه به یک داده ۲۴ بیتی تبدیل می‌شود و داده حاصل به وسیله ارتباط سریال دو سیمه به ریزوایپایش گر منتقل می‌شود. بخش الکترونیکی استفاده شده برای اندازه‌گیری ظرفیت خازن در طرح شکل (۴-۴) و شکل (۵-۴) نشان داده شده است. این طرح توسط نرم افزار Altium Designer 15 طراحی و بر روی برد PCB تهیه شده است.



شکل (۴-۴): شماتیک بخش الکترونیکی رطوبت‌سنج خانگی



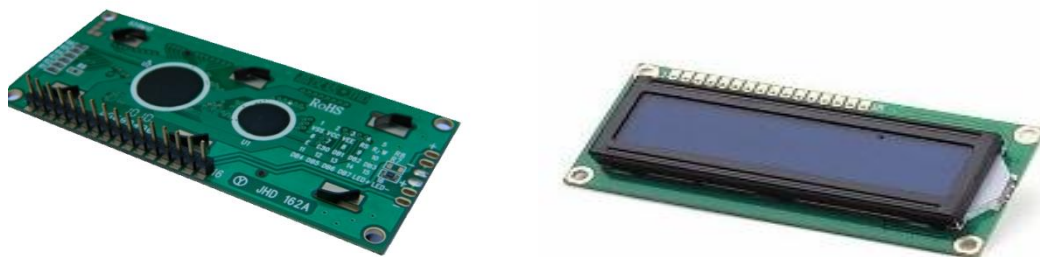
شکل (۴-۵): طرح جانمایی بخش الکترونیکی رطوبت‌سنج خانگی

پین هدر ۵ برای برنامه‌ریزی ریزواپایش گر Atmega16L استفاده شده است. همچنین می‌توان برای برنامه‌ریزی ریزواپایش گر از پروگرامر بهره برد.

مدار مجتمع‌های AD7745 و AD7746 دارای خصوصیات و ویژگی یکسانی می‌باشند. تراشه AD7746 قابلیت اندازه‌گیری غیرهمزمان دو خازن متغیر را داراست اما AD7745 این قابلیت را ندارد. پین هدر ۳ و ۴ در شکل (۴-۴) برای اندازه‌گیری غیر همزمان خازن متغیر در مدار مجتمع AD7746 تعبیه شده است در حالیکه در مدار مجتمع AD7745 فقط از پین هدر ۳ استفاده می‌گردد و پین هدر ۴ به صورت مدار باز قرار می‌گیرد.

۴-۳-۳ - بخش نمایشگر

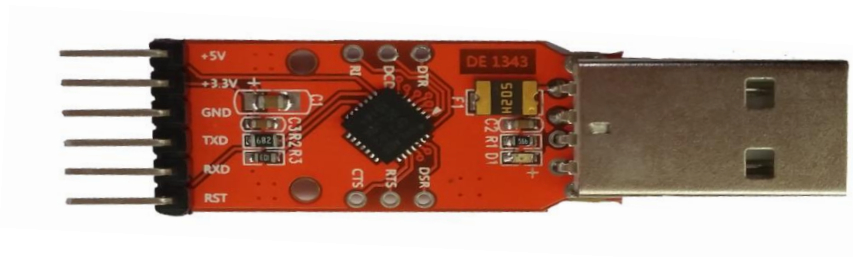
داده‌های حاصل از اندازه‌گیری را می‌توان بر روی LCD کاراکتری یا رایانه نمایش داد. شکل (۴-۶) LCD کاراکتری را نشان می‌دهد.



شکل (۴-۶): LCD کاراکتری

برای نمایش داده‌ها بر روی رایانه نیاز به ماژول USB به سریال می‌باشد. علاوه بر این، از این ماژول می‌توان به عنوان منبع تغذیه با ولتاژ ۳/۳۷ یا ۵V استفاده نمود. این ماژول در شکل (۴-۷) نشان داده

شده است. این ماژول از طریق ارتباط سریال USART با ریزواپایش گر در ارتباط است.

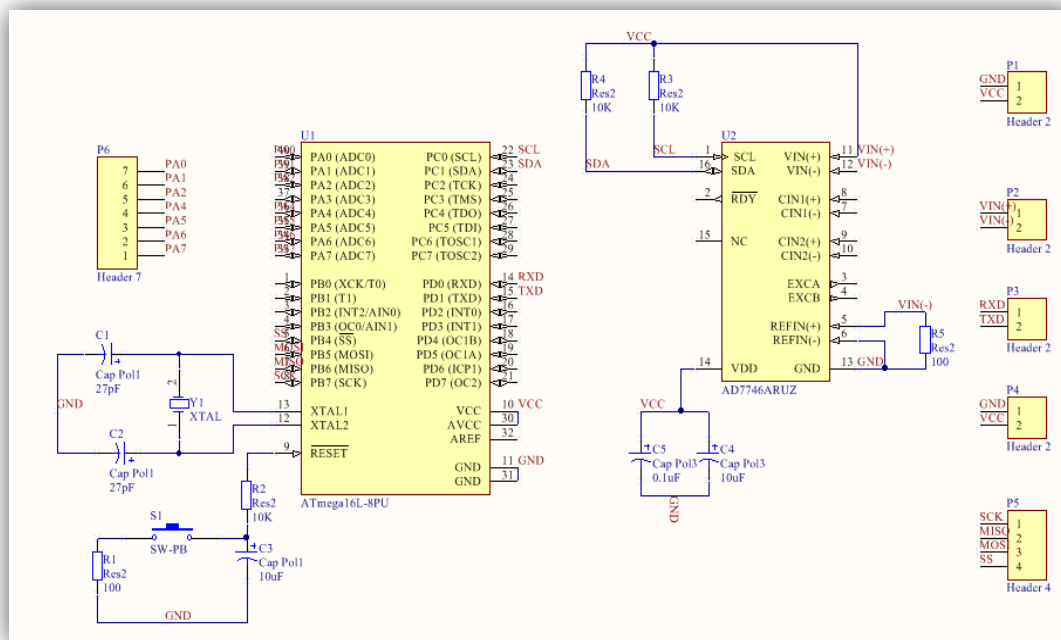


شکل (۴-۷): ماژول USB به سریال

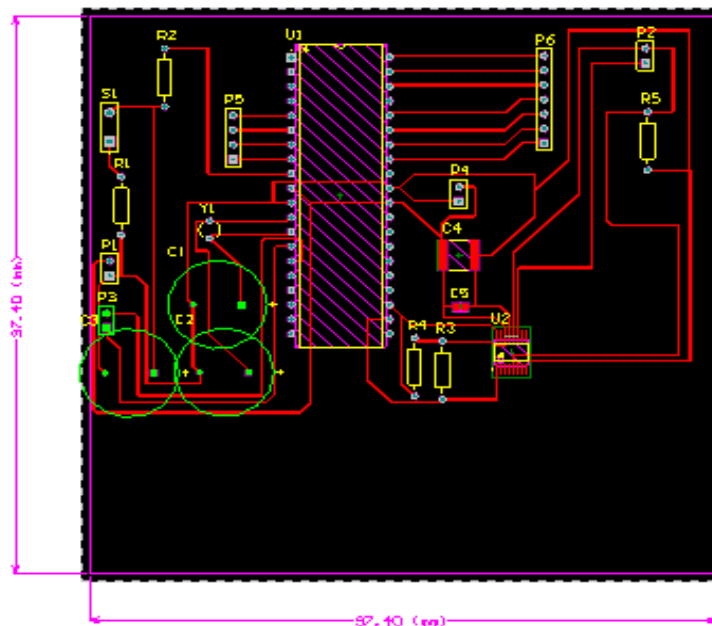
۴-۴- اندازه‌گیری رطوبت خاک با روش مقاومتی

برای تعیین رطوبت خاک می‌توان از روش مقاومتی نیز استفاده نمود. مقدار مقاومت خاک با تغییر مقدار رطوبت خاک تغییر می‌کند، در نتیجه می‌توان با پایش مقدار مقاومت خاک، مقدار رطوبت خاک را برآورد نمود. برای اندازه‌گیری مقاومت می‌توان از مقاومت دو الکتروود که درون خاک قرار داده شده است، استفاده کرد.

مدار مجتمع AD7745/46 می‌تواند ولتاژ دو سر مقاومت متغیر را به یک داده ۲۴ بیتی تبدیل نماید. مقاومت دوسر الکتروود که درون خاک قرار دارد با میزان رطوبت تغییر می‌کند در نتیجه ولتاژ دو سر الکتروود نیز تغییر می‌کند. بنابراین می‌توان با کمک مدار مجتمع AD7745/46 ولتاژ دو سر الکتروود را اندازه‌گیری نمود. بخش الکترونیکی استفاده شده برای اندازه‌گیری رطوبت خاک به روش مقاومتی در طرح شکل (۴-۸) و شکل (۴-۹) نشان داده شده است.



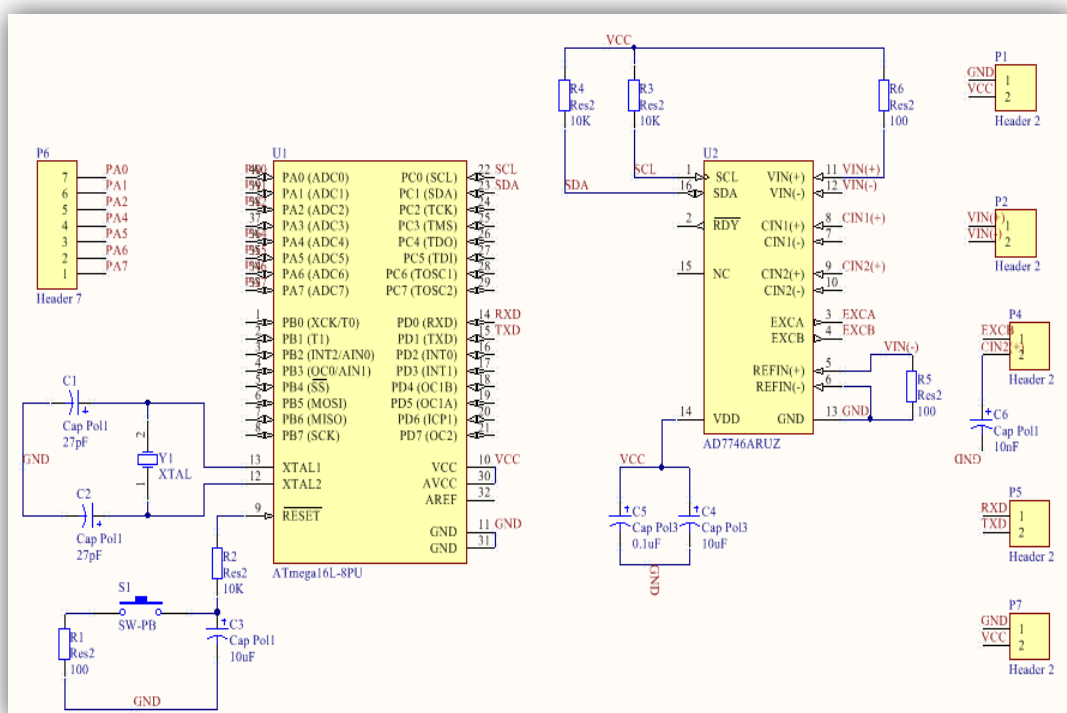
شکل (۴-۸): شماتیک بخش الکترونیکی رطوبت‌سنج مقاومتی



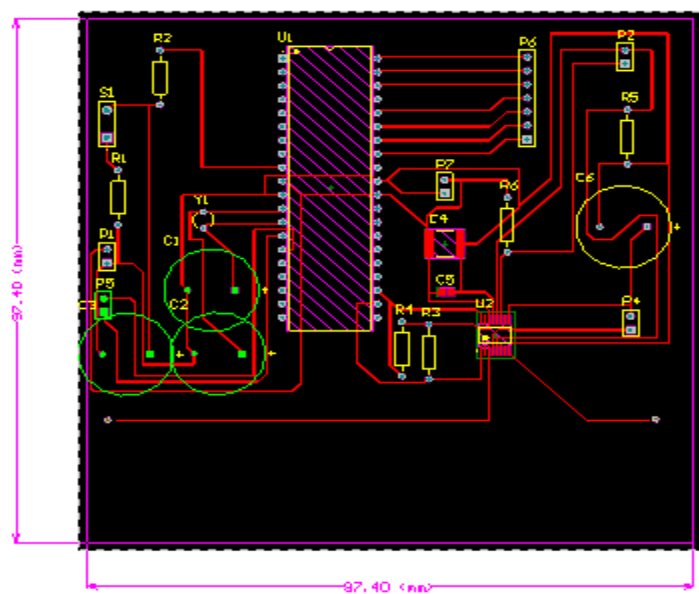
شکل (۴-۹): طرح جانمایی بخش الکترونیکی رطوبت‌سنج مقاومتی

۴-۵- اندازه‌گیری رطوبت خاک با حسگرهای خازنی و مقاومتی

در این بخش مدار اندازه‌گیری رطوبت خاک طراحی شده است که می‌تواند رطوبت خاک را بر مبنای روش خازنی و مقاومتی اندازه‌گیری نمود. فضای اشغالی کمتر در مدار چاپی و هزینه پایین آن از مزایای این مدار می‌باشد که شکل (۴-۱۰) و شکل (۴-۱۱) نشان داده شده است.

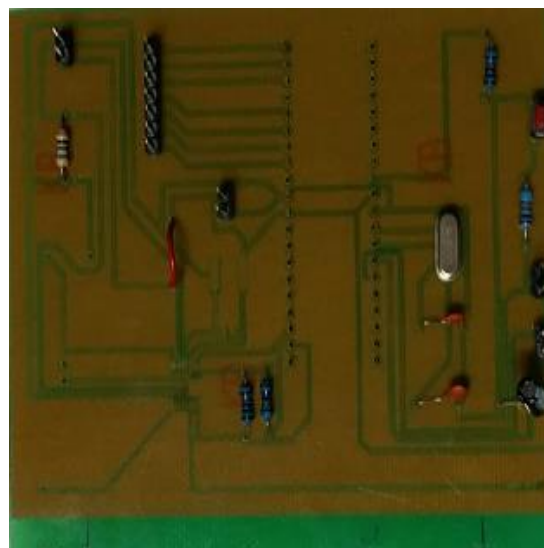


شکل (۴-۱۰): شماتیک بخش الکترونیکی مدار نهایی



شکل (۱۱-۴): طرح جانمایی بخش الکترونیکی مدار نهایی

جانمایی مدار نهایی اندازه‌گیری رطوبت خاک شکل (۱۲-۴) در نشان داده شده است.



شکل (۱۲-۴): مدار نهایی اندازه‌گیری رطوبت خاک

۴-۶- نرم افزار Code vision AVR

امروزه نرم افزارهای مختلفی برای انتقال داده‌ها و برنامه نویسی AVR به بازار عرضه شده‌اند که از جمله مهم‌ترین آنها، می‌توان نرم افزارهای CodeisionAVR، Imagecraft، GCC(GNU) و IAR به زبان C و C++ و کامپایلرهای Bascom و AVR Fast به بان Basic و E-lab به زبان اشاره کرد که میان آنها نرم افزارهای Codevision و Imagecraft از اهمیت بیشتری برخوردارند.

CodeisionAVR یک نرم افزار C، محیط توسعه یافته گرافیکی یکپارچه و تولیدکننده خودکار کدهای برنامه است که برای کار با ریزوآپایش گرهای AVR، ساخت شرکت Amel، طراحی شده است. این نرم افزار یک پروگرامر ISP را نیز شامل می‌گردد که امکانات انتقال کدهای برنامه به ریزوآپایش گر را بعد از انجام موفق برنامه نویسی فراهم می‌آورد.

نرم افزار CodeisionAVR شامل کتابخانه‌های قدرتمندی است که به کمک آنها کار با LCDهای کاراکتری، ارتباط SPI، I2C، ارتباط یک سیمه و کار با سنسورهای دمای LM75، DS1820، EEPROMهای سریال و RTCهای سریال را آسان می‌کند.

نرم افزار CodeisionAVR دارای یک محیط گرافیکی ویژه به نام CodeWizard است که برنامه نویسی را بسیار آسان می‌نماید. این برنامه امکان تنظیم بخش‌های مختلف تراشه از قبیل تایمرها، ADC، SPI، TWI و غیره را بدون نوشتن کد برای آنها فراهم می‌کند. در این برنامه به صورت گرافیکی تنظیمات اولیه انجام می‌شود، سپس CodeWizard کدهای لازم را تولید می‌کند، بدین صورت در کمترین زمان ممکن برنامه نوشته می‌شود.

فصل پنجم: نتایج

۵-۱- پیشگفتار

در فصل قبل ساختار الکتریکی سامانه اندازه‌گیری رطوبت خاک ارائه شد. در این فصل به بررسی نتایج اندازه‌گیری این سامانه اندازه‌گیری پرداخته می‌شود.

۵-۲- روش انجام آزمایش خازنی

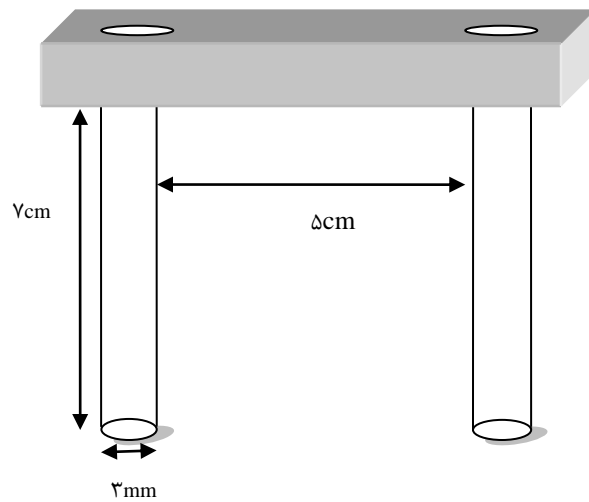
مقداری خاک الک شده به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد در اجاق مخصوص^۱ قرار داده شد تا کاملاً خشک گردد. وزن مشخصی از خاک خشک در ظرف مورد استفاده اضافه گردید و جوشن‌های حسگر در خاک فرو برده شد. در طی چند نوبت به خاک خشک مقدار مشخصی آب افزوده شد. مقدار آب تا اندازه‌ای اضافه شد تا خاک به حالت اشباع برسد. در ادامه باید نمونه خاک با گذشت زمان به تدریج خشک شود. در نتیجه جرم نمونه خاک به علت تبخیر آب کاهش می‌یابد. جرم نمونه خاک و ظرفیت خازنی خاک در همان زمان به طور پیوسته اندازه‌گیری و ثبت گردید. مدار مجتمع AD7745/46 مقدار اندازه‌گیری را به صورت یک داده ۲۴ بیتی درآورده و با استفاده از ارتباط دوسیمه TWI به ریزوآپایش گر ATmega16L منتقل می‌شود. ریزوآپایش گر، ظرفیت خازنی اندازه‌گیری شده در AD7745/46 را بر روی LCD کاراکتری و رایانه نشان می‌دهد.

در این آزمایش از حسگر میله استوانه‌ای با قطر تقریبی ۳ میلی‌متر و طول ۷ سانتی‌متر که در فاصله ۵ سانتی‌متر از یکدیگر ثابت شده‌اند، استفاده گردیده است. جوشن‌های حسگر خازنی با یک پوشش نارسا (مانند یک لوله لاستیکی) پوشانده شده‌اند تا از اتصال مستقیم آنها با خاک جلوگیری کند. این پوشش از ایجاد یک مسیر رسانای الکتریکی میان دو جوشن جلوگیری می‌کند و رسانایی میان دو جوشن تقریباً صفر می‌شود.

¹ Oven

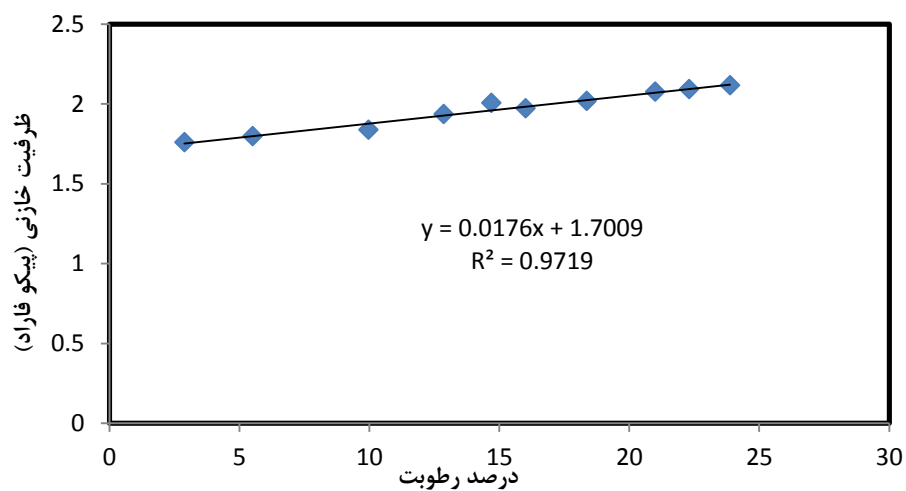
برای بدست آوردن درصد رطوبت خاک از معادله (۱-۵) استفاده شده است، که m_w جرم آب در نمونه خاک و m_d جرم خاک خشک می‌باشد.

$$w = \frac{m_w}{m_d} \times 100 \quad (۱-۵)$$

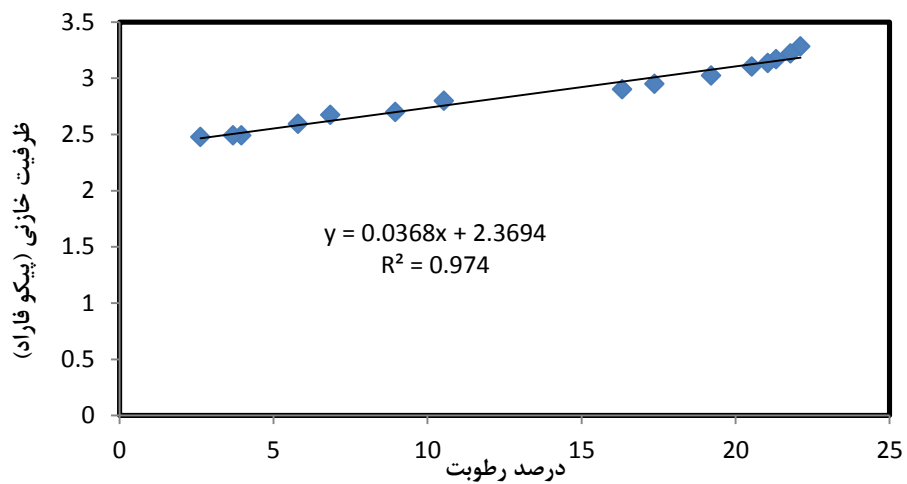


شکل (۱-۵): حسگر خازنی برای آزمایش خازنی

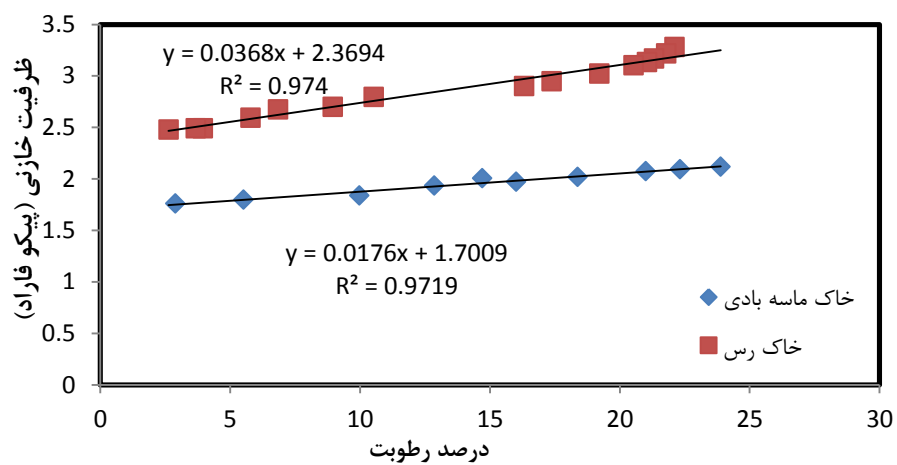
برای انجام روش خازنی از خاک ماسه بادی و خاک رس استفاده گردیده است و نتایج حاصل از اندازه‌گیری در شکل (۲-۵) و شکل (۳-۵) نشان داده شده است.



شکل (۲-۵): نمودار ظرفیت خازنی برحسب رطوبت خاک برای خاک ماسه بادی



شکل (۳-۵): نمودار ظرفیت خازنی برحسب رطوبت خاک برای خاک رس



شکل (۴-۵): نمودار مقایسه ظرفیت خازنی برحسب رطوبت خاک برای خاک‌های رس و ماسه بادی

جدول (۱-۵): تکرارپذیری رطوبت‌سنج خازنی

نوع خاک	قرائت اول	قرائت دوم	قرائت سوم	قرائت چهارم	درصد رطوبت
ماسه بادی	۲/۰۹۱۶۹۷۴۵۸	۲/۰۹۳۹۴۵۸۳	۲/۰۹۳۷۲۴۵۸	۲/۰۹۰۷۳۸۳	۲۲/۳۱
رس	۳/۲۷۹۵۵۵۹۱۲	۳/۲۷۶۷۲۳۴۳۷	۳/۲۷۱۰۹۶۶۲۵	۳/۲۷۵۹۹۹۸۵	۲۲/۱۱



شکل (۵-۵): مدار نهایی در حین آزمایش

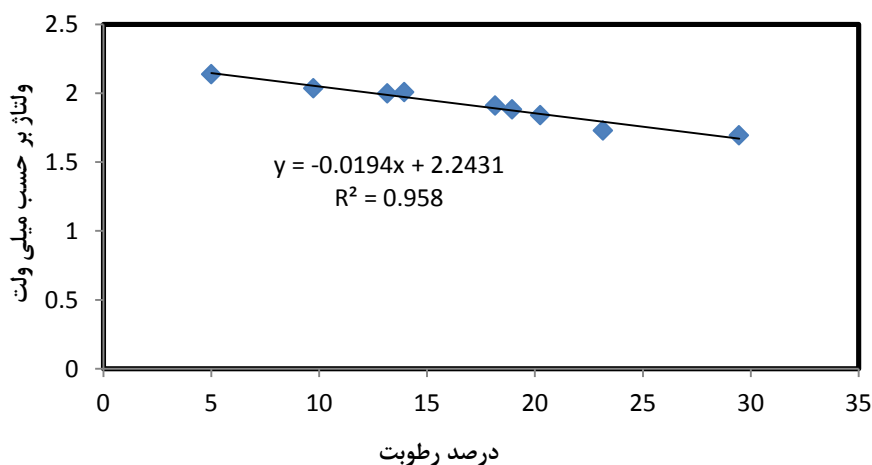
۵-۲-۱- نتایج رطوبت سنج خازنی

همانطور که در شکل (۲-۵) و شکل (۳-۵) مشاهده می‌شود با افزایش مقدار آب موجود در خاک خشک، ثابت دی‌الکتریک خاک تغییر کرده و باعث افزایش مقدار ظرفیت اندازه‌گیری شده خاک می‌گردد. با افزودن آب به خاک خشک، مقدار ثابت دی‌الکتریک خاک مرطوب بین ثابت دی‌الکتریک آب و خاک خشک می‌شود، در نتیجه ظرفیت خازنی نسبت به خاک خشک افزایش می‌یابد. همانطور که در شکل (۴-۵) نشان داده شده است، مقدار خازن اندازه‌گیری شده در یک مقدار مشخص از رطوبت خاک در خاک‌های ماسه بادی و رس متفاوت می‌باشد. در نتیجه نوع بافت خاک روی اندازه‌گیری تاثیر می‌گذارد.

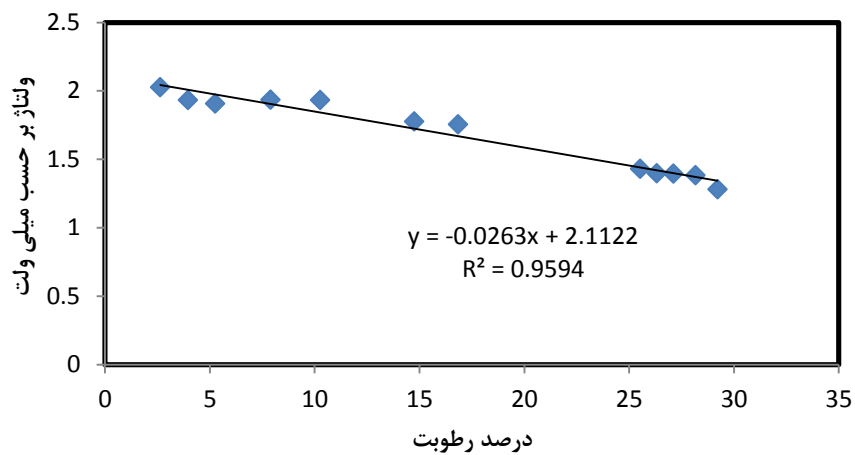
در جدول (۱-۵) تکرارپذیری رطوبت سنج خازنی مورد بررسی قرار گرفته است. بدین ترتیب که در یک درصد رطوبت خاک معین، ظرفیت خازنی در چهار اندازه گیری متوالی ثبت گردید. با مشاهده اختلاف کم قرائت‌های خوانده شده با یکدیگر، نتیجه می‌شود که تکرار پذیری مدار طراحی شده مناسب می‌باشد.

۳-۵- روش انجام آزمایش روش مقاومتی

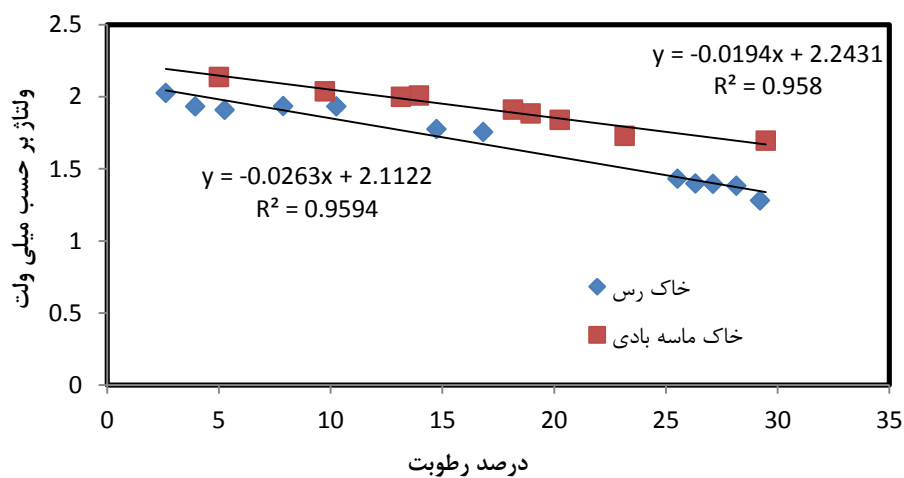
در این آزمایش کلیه مراحل بیان شده در آزمایش خازنی، انجام می‌شود و از حسگر شکل (۱-۵) بدون عایق در بر گیرنده آن، استفاده شده است. نتایج این اندازه‌گیری در شکل (۶-۵) و شکل (۷-۵) نشان داده شده است.



شکل (۶-۵): نمودار ولتاژ بر حسب رطوبت برای خاک ماسه بادی



شکل (۷-۵): نمودار ولتاژ بر حسب رطوبت برای خاک رس



شکل (۸-۵): نمودار مقایسه ولتاژ بر حسب رطوبت خاک برای خاک های رس و ماسه بادی

جدول (۲-۵): تکرارپذیری رطوبت‌سنج مقاومتی

نوع خاک	قرائت اول (میلی ولت)	قرائت دوم (میلی ولت)	قرائت سوم (میلی ولت)	قرائت چهارم (میلی ولت)	قرائت پنجم (میلی ولت)	درصد رطوبت
ماسه بادی	۱/۶۹۴۸۵۰۲	۱/۶۹۵۸۷۸۱	۱/۶۹۵۰۸۸۹	۱/۶۹۶۱۰۸۲	۱/۶۹۶۰۰۲۴	۲۹/۴۷
رس	۱/۲۷۹۶۷۳۶	۱/۲۷۶۸۶۱۷	۱/۲۷۴۶۸۵۸	۱/۲۷۵۵۸۵۹	۱/۲۷۴۷۷۰۹	۲۹/۲۱

۵-۳-۱- نتایج رطوبت‌سنج مقاومتی

همانطور که در شکل (۶-۵) و شکل (۷-۵) مشاهده می‌شود با افزایش مقدار آب موجود در خاک خشک، مقاومت خاک و ولتاژ کاهش می‌یابد. علت این امر وجود املاح معدنی در خاک می‌باشد. هنگامی که به خاک خشک، آب افزوده شود، مواد معدنی موجود در خاک درون آب حل می‌گردند. املاح پس از حل شدن در خاک به یون‌هایشان تفکیک می‌شوند که این یون‌ها قابلیت تحرک دارند و بر اساس ولتاژ و به سمت الکترودها حرکت می‌کنند. هر چه تعداد یون‌ها بیشتر باشد، این بدین منظور است که تعداد بارهای الکتریکی بیشتر است. هر بار الکتریکی ایجاد جریان می‌کند، در نتیجه با افزایش یون‌ها، میزان جریان افزایش و مقدار ولتاژ و مقاومت کاهش می‌یابد. همانطور که در شکل (۸-۵) نشان داده شده است، اندازه‌گیری رطوبت خاک به روش مقاومتی پیشنهادی مستقل از بافت خاک نمی‌باشد بخاطر اینکه مقدار ولتاژ اندازه‌گیری شده، در یک مقدار مشخص از رطوبت خاک در خاک‌های ماسه بادی و رس متفاوت می‌باشد. در جدول (۲-۵) تکرارپذیری رطوبت‌سنج مقاومتی مورد بررسی قرار گرفته است. بدین ترتیب که در یک درصد رطوبت خاک معین، پتانسیل در پنج اندازه‌گیری متوالی ثبت گردید. با مشاهده اختلاف کم قرائت‌های خوانده شده با یکدیگر، نتیجه می‌شود که تکرار پذیری مدار طراحی شده مناسب می‌باشد.

۵-۴- نتیجه گیری

برای اندازه گیری رطوبت خاک روش های گوناگونی مانند روش نوترونی TDR، تانسئومتر، خازنی و مقاومتی، وجود دارد. در این پایان نامه از روش خازنی برای تعیین رطوبت خاک استفاده شده است. پاسخ دهی لحظه ای، نداشتن خطر سلامتی و دقت مناسب، دلایل انتخاب روش خازنی می باشد. برای رسیدن به این هدف، از مدار مجتمع AD7745/46 که مقدار ظرفیت خازن را اندازه گیری می کند، استفاده شده است.

مقادیر اندازه گیری روش خازنی نشان می دهد که با افزایش مقدار رطوبت خاک، مقدار ثابت دی الکتریک خازنی که درون خاک قرار دارد و خاک به عنوان دی الکتریک آن است، نیز افزایش می یابد، در نتیجه مقدار ظرفیت خازنی خاک مرطوب نسبت به خاک خشک افزایش می یابد.

آذر خورسندی و همکاران رطوبت خاک را بر حسب هدایت الکتریکی و ظرفیت خازنی اندازه گیری نمودند [۵۱].

جدول (۵-۳): مقایسه ضریب همبستگی روش های اندازه گیری رطوبت خاک

روش اندازه گیری	روش خازنی پیشنهادی	روش مقاومتی پیشنهادی	آذر خورسندی (ظرفیت خازنی)	آذر خورسندی (هدایت الکتریکی)
ضریب همبستگی (R^2)	۰/۹۷	۰/۹۵	۰/۸۴۵	۰/۸۳۴۵

بر طبق جدول (۵-۳)، روش خازنی پیشنهادی به علت ضریب همبستگی بهتر نسبت به روش مقاومتی پیشنهادی و روش های آذر خورسندی [۵۱]، رطوبت خاک را بهتر اندازه گیری می کند.

علاوه بر روش پیشنهادی، روش مقاومتی نیز در این پایان نامه انجام شد. نتایج نشان داد که با

افزایش مقدار رطوبت خاک، میزان مقاومت خاک کاهش و در نتیجه ولتاژ دو سر مقاومت نیز کاهش می‌یابد.

پیشنهادات -۵-۵

- ❖ برای افزایش گستره اندازه‌گیری می‌توان از مدار مجتمع AD8515 استفاده نمود.
- ❖ طراحی و اندازه‌گیری رطوبت در عمق‌های مختلف خاک
- ❖ بررسی تاثیر دما بر روی اندازه‌گیری رطوبت خاک

پیوست

۶-۱- ثابت‌های مربوط به کانال خازنی

مدار مجتمع AD7745/46 دارای حالت‌های مختلف اندازه‌گیری می‌باشد. در این پایان نامه از حالت خازنی آن استفاده شده است. در نتیجه در این بخش به توصیف انواع رجسترهای AD7745/46 که برای حالت خازنی الزامی می‌باشد، می‌پردازیم.

۶-۱-۱- ثابت STATUS

ثبات STATUS وضعیت تبدیل‌کننده را نشان می‌دهد و برای بررسی اتمام تبدیل مورد استفاده قرار می‌گیرد. این ثابت فقط خواندنی است. آدرس دسترسی به این ثابت 0x00 است و داری مقدار پیش فرض 0x07 می‌باشد (جدول (۶-۱)).

جدول (۶-۱): ثابت STATUS

بیت ۰	بیت ۱	بیت ۲	بیت ۳	بیت ۴	بیت ۵	بیت ۶	بیت ۷	بیت
RDYCAP	RDYVT	RDY	EXCERR	-	-	-	-	نام بیت
۱	۱	۱	۰	۰	۰	۰	۰	پیش- فرض

پایه \overline{RDY} مدار مجتمع منعکس‌کننده بیت RDY ثابت حالت است. در اتمام تبدیل بیت RDY صفر می‌شود. بنابراین هنگامی که تبدیل کامل شود، این پایه از سطح یک منطقی به سطح صفر منطقی تغییر می‌کند.

بیت‌های RDYCAP و RDYVT هنگامی صفر می‌شوند که به ترتیب تبدیل خازنی و ولتاژ/دما به اتمام رسیده باشد و داده جدید در دسترس باشد. وقتی که هر دو حالت AD7745/46 فعال باشند، بعد از اتمام هر دو تبدیل بیت RDY صفر می‌شود. اگر فقط یکی از حالت‌های خازنی و ولتاژ/دما فعال باشد، بیت RDY منعکس کننده اتمام تبدیل همان حالت می‌باشد.

۶-۱-۲- ثبات CAP DATA

داده خروجی حالت خازنی در ثبات CAP DATA نگهداری می‌شود. این ثبات فقط خواندنی است و داری مقدار پیش فرض 0x000000 می‌باشد. این ثبات از سه ثبات جدا از هم تشکیل شده است و آدرس‌های دسترسی به این ثبات‌ها 0x01، 0x02 و 0x03 می‌باشد. بعد از اتمام تبدیل خازنی این ثبات بروزرسانی می‌گردد. برای اینکه بعضی از نتایج از بین نروند، قبل از اینکه تبدیل جدید خازنی به اتمام برسد، باید محتوای ثبات CAPDAC خوانده شود.

مقیاس داده خوانده شده در ثبات CAPDAC به صورت زیر می‌باشد:

کد 0x000000 بیانگر مقیاس منفی^۱ (-۴/۰۹۶pF)، کد 0x800000 بیانگر مقیاس صفر^۲ و کد 0xFFFFFFFF بیانگر مقیاس مثبت^۳ می‌باشد.

۶-۱-۳- ثبات CAP SET_UP

ثبات CAP SET_UP برای تنظیمات اولیه حالت خازنی استفاده می‌شود. این ثبات می‌تواند توسط Master به طریق ارتباط دو سیم خوانده و نوشته شود. آدرس دسترسی به این ثبات 0x07 است و داری

^۱ Negative active full scale

^۲ Zero scale

^۳ Positive full scale

مقدار پیش فرض 0x00 می باشد (جدول (۲-۶)).

جدول (۲-۶): ثبات CAP SET_UP

بیت ۰	بیت ۱	بیت ۲	بیت ۳	بیت ۴	بیت ۵	بیت ۶	بیت ۷	بیت
CAPCHOP	-	-	-	-	CAPDIFF	CIN2	CAPEN	نام بیت
•	•	•	•	•	•	•	•	پیش- فرض

توسط بیت CAPEN این ثبات، کانال خازنی مدار مجتمع AD7745/46 برای حالت‌های تک پایه و پیوسته فعال می‌گردد. برای استفاده از حالت خازنی تفاضلی AD7745/46 باید بیت CAPDIFF این رجستر باید یک شود. مدار مجتمع AD7746 دارای دو درگاه خازنی می‌باشد برای فعال کردن درگاه دوم باید بیت CIN2 یک گردد. AD7745 فقط دارای یک گذرگاه خازنی می‌باشد. بنابراین این بیت در AD7745 باید صفر گردد.

۶-۱-۴ - ثبات EXC SET-UP

این ثبات پایه محرک مدار مجتمع AD7745/46 را تنظیم می‌کند. این ثبات می‌تواند توسط Master به طریق ارتباط دو سیم خوانده و نوشته شود. آدرس دسترسی به این ثبات 0x09 است و دارای مقدار پیش فرض 0x03 می‌باشد (جدول (۳-۶)).

جدول (۳-۶): ثبات EXC SET-UP

بیت	بیت ۰	بیت ۱	بیت ۲	بیت ۳	بیت ۴	بیت ۵	بیت ۶	بیت ۷	بیت
نام	EXCVL0	EXCLVL1	$\overline{\text{EXCA}}$	EXCA	$\overline{\text{EXCB}}$	EXCB	EXCON	CLKCTRL	
بیت	۱	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	
پیش-فرض									

این ثبات منبع محرک را فعال می کند و هنگامی که یک منبع محرک فعال شد، باید مکمل آن غیرفعال گردد. برای اینکه سیگنال محرک در طول تبدیل خازنی حاضر باشد باید بیت EXCON صفر شود. اگر EXCON یک باشد، سیگنال محرک در طول تبدیل های خازنی و ولتاژ/دمایی وجود دارد. سطح منبع محرک به وسیله بیت های EXCLVL0 و EXCLVL1 این ثبات تعیین می گردد. انواع سطوح سیگنال محرک در جدول (۴-۶) نشان داده شده است.

جدول (۴-۶): سطوح سیگنال محرک

EXCLVL1	EXCLVL0	Voltage on cap	EXC Pin Low Level	EXC Pin High Level
۰	۰	$\pm V_{DD}/8$	$V_{DD} \times 3/8$	$V_{DD} \times 5/8$
۰	۰	$\pm V_{DD}/4$	$V_{DD} \times 1/4$	$V_{DD} \times 3/4$
۱	۱	$\pm V_{DD} \times 3/8$	$V_{DD} \times 1/8$	$V_{DD} \times 7/8$
۱	۱	$\pm V_{DD}/2$	۰	V_{DD}

ثبات CONFIGURATION - ۵-۱-۶

ثبات CONFIGURATION نرخ بروزسانی و مد عملیاتی را تعیین می کند. این ثبات می تواند

توسط Master به طریق ارتباط دو سیم خوانده و نوشته شود. آدرس دسترسی به این ثبات 0x0A است و داری مقدار پیش فرض 0xA0 می باشد (جدول (۵-۶)).

جدول (۵-۶): ثبات CONFIGURATION

بیت ۰	بیت ۱	بیت ۲	بیت ۳	بیت ۴	بیت ۵	بیت ۶	بیت ۷	بیت
MD0	MD1	MD2	CAPF0	CAPF1	CAPF2	VTF0	VTF1	نام بیت
۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۱	پیش فرض

از ترکیب بیت‌های MD2، MD1 و MD0 واقع در ثبات CONFIGURATION، مطابق با جدول (۶-۶) برای تعیین مد مدار مجتمع AD7745/46 استفاده می شود.

جدول (۶-۶): مدهای AD7745/46

MM2	MD1	MD0	Mode
0	0	0	Idle
0	0	1	Continuous conversion
0	1	0	Single conversion
0	1	1	Power-Down
1	0	0	-
1	0	1	Capacitance system offset calibration
1	1	0	Capacitance or voltage system gain calibration
1	1	1	-

برای تعیین نرخ بروزرسانی تبدیل خازنی مطابق جدول (۷-۶) از ترکیب بیت‌های CAPF0، CAPF1 و CAPF2 استفاده می شود.

جدول (۶-۷): نرخ بروزسانی تبدیل خازنی

			VTCHOP=1		
CAPF2	CAPF1	CAPF0	زمان تبدیل (ms)	نرخ بروزسانی (Hz)	فرکانس (Hz) -۳db
۰	۰	۰	۱۱/۰	۹۰/۹	۸۷/۲
۰	۰	۱	۱۱/۹	۸۳/۸	۷۹/۰
۰	۱	۰	۲۰/۰	۵۰/۰	۴۳/۶
۰	۱	۱	۳۸/۰	۲۶/۳	۲۱/۸
۱	۰	۰	۶۲/۰	۱۶/۱	۱۳/۱
۱	۰	۱	۷۷/۰	۱۳/۰	۱۰/۵
۱	۱	۰	۹۲/۰	۱۰/۹	۸/۹
۱	۱	۱	۱۰۹/۶	۹/۱	۸/۰

هنگامی که بیت CLKCTRL ثابت EXC SET-UP صفر باشد، نرخ بروزسانی مطابق جدول (۶-۷)

می‌باشد. اگر بیت CLKCTRL یک گردد، زمان تبدیل طولانی‌تر می‌شود.

ثبات CAP DAC A - ۶-۱-۶

ثبات CAP DAC A تنظیمات DAC را انجام می‌دهد. این ثبات می‌تواند توسط Master به طریق ارتباط دو سیم خوانده و نوشته شود. آدرس دسترسی به این ثبات 0x0B است و داری مقدار پیش فرض 0x00 می‌باشد (جدول (۸-۶)).

جدول (۸-۶): ثبات CAP DAC A

بیت ۰	بیت ۱	بیت ۲	بیت ۳	بیت ۴	بیت ۵	بیت ۶	بیت ۷	بیت
DACA-7 Bit Value							DACAENA	نام بیت
0x00							۰	پیش فرض

بیت DACENA برای فعال کردن DACA استفاده می‌شود و بیت ۰ تا ۶ این ثبات مقدار DACA را تعیین می‌کند.

ثبات CAP DAC B - ۷-۱-۶

ثبات CAP DAC B تنظیمات DAC را انجام می‌دهد. این ثبات می‌تواند توسط Master به طریق ارتباط دو سیم خوانده و نوشته شود. آدرس دسترسی به این ثبات 0x0C است و داری مقدار پیش فرض 0x00 می‌باشد (جدول (۹-۶)).

جدول (۹-۶): ثبات CAP DAC B

بیت ۰	بیت ۱	بیت ۲	بیت ۳	بیت ۴	بیت ۵	بیت ۶	بیت ۷	بیت
DACB-7 Bit Value							DACAENB	نام بیت
0x00							۰	پیش فرض

بیت DACENB برای فعال کردن DACB استفاده می‌شود و بیت ۰ تا ۶ این ثبات مقدار DACB را تعیین می‌کند.

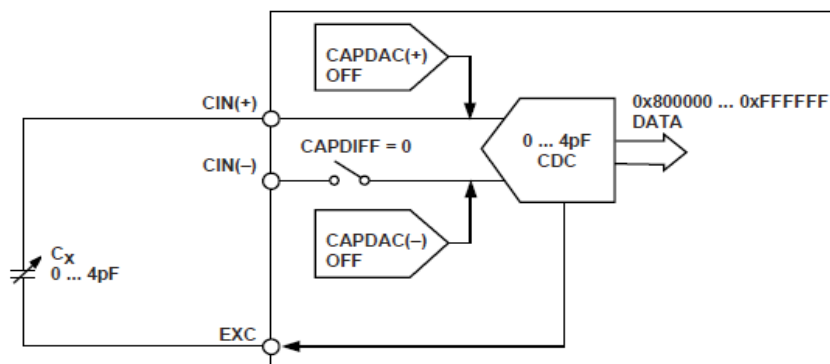
DAC -۱-۷-۱-۶

محدوده ورودی مقیاس کامل AD7745/46، $\pm 4/0.96\text{pF}$ می‌باشد. در صورتی که خازن ورودی بزرگتر از $\pm 4/0.96\text{pF}$ باشد، می‌توان با استفاده از CAPDAC‌های داخل تراشه خازن را اندازه‌گیری کرد. CAPDAC مانند خازن منفی عمل می‌کند که به صورت داخلی به پایه CIN وصل شده است. در تراشه AD7745/46 شامل دو CAPDAC مستقل از هم می‌باشد که یکی از آنها به پایه CIN(+) و دیگری به پایه CIN(+) وصل می‌شود. رابطه بین خازن ورودی و داده خروجی مطابق با معادله (۱-۶) می‌باشد.

$$DATA \approx (C_x - CAPDAC(+)) - (C_y - CAPDAC(-)) \quad (1-6)$$

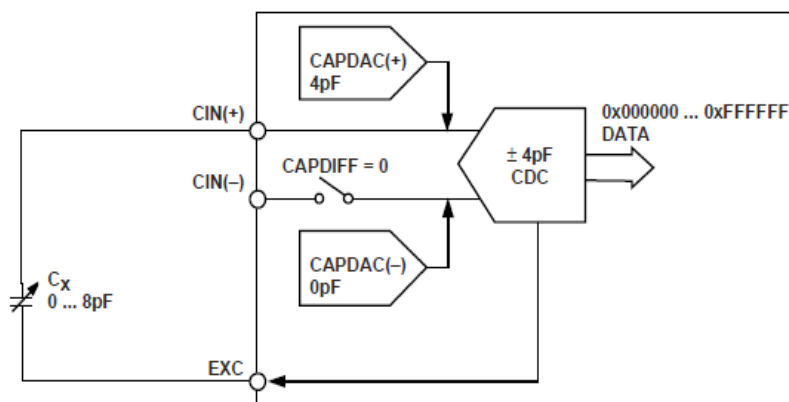
که C_x و C_y خازن‌های ورودی می‌باشند.

وضوح CAPDAC‌ها هفت بیت می‌باشد و محدوده کامل CAPDAC کالیبره کارخانه نمی‌باشد و می‌تواند در فرآیند ساخت تا حدود $\pm 20\%$ تغییر کند. در تراشه AD7746، CAPDAC توسط دو کانال خازنی تقسیم می‌شود. اگر CAPDAC‌ها نیاز به تنظیمات جداگانه داشته باشند، نرم افزار کنترل کننده میزبان باید مقادیر CAPDAC را قبل از اجرای تبدیل بر روی یک کانال دیگر بار گذاری مجدد نماید. هنگامی که مد تک پایه انتخاب گردد، پایه CIN(-) مدار باز می‌شود. CDC بدون استفاده از CAPDAC فقط خازن‌های ورودی در محدوده‌ی صفر تا ۴Pf را اندازه‌گیری می‌کند (شکل (۱-۶)).



شکل (۱-۶): مد خازنی تک سر با غیر فعال بودن CAPDAC

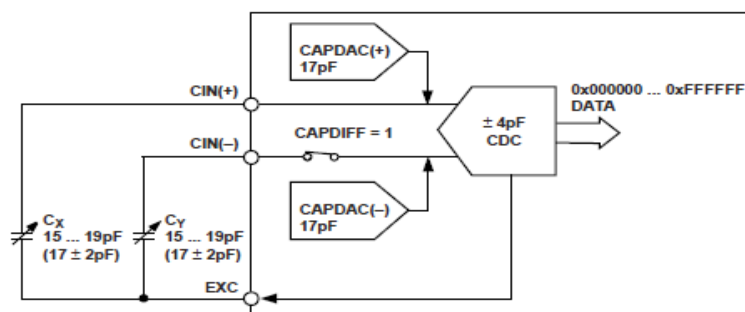
CAPDAC می‌تواند برای شیفت دادن محدوده‌ی ورودی استفاده شود. به طور مثال، شکل (۲-۶) نشان می‌دهد که چگونه با استفاده از محدوده‌ی $\pm 4\text{pF}$ برای اندازه‌گیری خازن بین صفر تا 8pF استفاده می‌شود.



شکل (۲-۶): مد خازنی تک سر با فعال بودن CAPDAC

هنگامی که مد تفاضلی انتخاب گردد، CDC تفاوت بین خازن‌های ورودی را اندازه‌گیری می‌کند. خازن‌های ورودی بین پایه‌های CIN و EXC بدون استفاده از CAPDAC باید کمتر از $4/096\text{pF}$ باشد اما با استفاده از CAPDAC باید کمتر از 21pF باشد و مقدار $(C_x - \text{CAPDAC}(+))$ و $(C_y - \text{CAPDAC}(-))$ باید کمتر از $4/096\text{pF}$ باشند. هنگامی که خازن بین CIN و EXC بزرگتر از $4/096\text{pF}$ باشد، CDC خطا را نشان می‌دهد. شکل (۳-۶) نمونه‌ای از کاربرد CAPDAC در مد تفاضلی

می باشد.



شکل (۶-۳): مد خازنی تفاضلی با فعال بودن CAPDAC

۶-۱-۸- ثبات CAP OFFSET CALIBRATION

ضریب کالیبراسیون مقیاس صفر کانال خازنی در ثبات CAP OFFSET CALIBRATION نگهداری می شود. این ثبات ۱۶ بیتی می باشد و می تواند توسط Master به طریق ارتباط دو سیم خوانده و نوشته شود. آدرس های دسترسی به این ثبات 0x0D و 0x0E است و داری مقدار پیش فرض 0x8000 می باشد. ضریب کالیبراسیون برای از بین بردن آفست کانال خازنی استفاده می گردد. برای محدوده ی کامل ۱pF، وضوح این ثبات کمتر از ۳۲aF است. آفست خازنی به وسیله آفست پارازیتی کاربردی مثل خازن اولیه حسگر، خازن برد و خازن اتصالات دیگر بین حسگر و AD7745/46 ایجاد می شود. AD7745/46 برای آفست خازنی کالیبره کارخانه نمی باشد. بنابراین کاربر موظف است در کاربردهای متفاوت سامانه را کالیبره کند. آفست ورودی خازنی بزرگتر از $\pm 1\text{pF}$ باید با استفاده از CAPDAC ها داخل مدار مجتمع AD7745/46 برطرف نمود. آفست های کوچک در محدوده ی $\pm 1\text{pF}$ را می توان به وسیله ثبات کالیبراسیون آفست خازنی از بین برد.

اعمال مقیاس صفر ورودی خازنی AD7745/46 و اجرای مد کالیبراسیون آفست خازنی، یک روش

برای از بین بردن آفست می‌باشد. روش دیگر محاسبه و نوشتن مقدار آفست در ثبات کالیبراسیون آفست است. بعد هر ریست و خاموش شدن مدار مجتمع AD7745/46، مقدار پیش فرض در ثبات کالیبراسیون آفست بارگذاری می‌شود. بنابراین باید مقدار کالیبراسیون تنظیم شده باید در ریز واپایش‌گر مورد استفاده ذخیره گردد و بعد روشن شدن AD7745/46 دوباره بارگذاری شود.

تراشه AD7746 توسط دو کانال خازنی تقسیم می‌شود. اگر کانال‌های خازنی نیاز به کالیبراسیون آفست به طور جداگانه داشته باشند، نرم افزار کنترل کننده میزبان باید مقدار ثبات کالیبراسیون آفست خازنی را بعد از انجام کالیبراسیون آفست بر روی هر یک از کانال‌ها بخواند و این مقدار را قبل از اجرای تبدیل بر روی یک کانال دیگر بار گذاری مجدد می‌کند.

۶-۱-۹- ثبات کالیبراسیون بهره خازنی

هنگام تولید تراشه‌های AD7745/46، بهره هر تراشه به طور مجزا برای مقیاس کامل $\pm 4/096pF$ کالیبره می‌گردد. ضریب بهره کارخانه در حافظه‌ی یکبار قابل برنامه ریزی^۱ ذخیره و پس از هر ریست و خاموش شدن در ثبات بهره کپی می‌شود. این ثبات ۱۶ بیتی می‌باشد و می‌تواند توسط Master به طریق ارتباط دو سیم خوانده و نوشته شود. آدرس‌های دسترسی به این ثبات 0x10 و 0x0F است و داری مقدار پیش فرض 0XXXXX می‌باشد. می‌توان با نوشتن یک مقدار در ثبات بهره توسط کاربر یا اجرای مد کالیبراسیون خازنی مقدار این ثبات تغییر داد. اما این تغییر موقتی بوده و پس از خاموش و ریست شده AD7745/46 مقدار پیش فرض دوباره بارگذاری می‌شود. این قطعه فقط با مقدار پیش فرض ضریب کالیبراسیون کارخانه آزمایش گردید [۴۸].

¹ One-Time Programmable (OTP)

۲-۶- ثبات‌های ولتاژ/جریان

در این قسمت به شرح ثبات‌های مد ولتاژ/دما مدار مجتمع AD7745/46 پرداخته می‌شود.

۱-۲-۶- ثبات VT DATA

داده خروجی حالت ولتاژ/خازنی در ثبات VT DATA نگهداری می‌شود. این ثبات فقط خواندنی است و داری مقدار پیش فرض 0x000000 می‌باشد. این ثبات از سه ثبات جدا از هم تشکیل شده است و آدرس‌های دسترسی به این ثباتها 0x04، 0x05 و 0x06 می‌باشد. بعد از اتمام تبدیل، ولتاژ یا دما این ثبات برورسانی می‌گردد. برای اینکه بعضی از نتایج از بین نروند، قبل از اینکه تبدیل جدید ولتاژ/جریان به اتمام برسد، باید محتوای ثبات VT DAC خوانده شود. مقیاس داده خوانده شده در ثبات VT DAC برای حالت ولتاژ به صورت زیر می‌باشد:

کد 0x000000 بیانگر مقیاس منفی ($-V_{REF}$)، کد 0x800000 بیانگر مقیاس صفر (0V) و کد 0xFFFFFFFF بیانگر مقیاس مثبت ($+V_{REF}$) می‌باشد.

داده حاصل در حالت سنسور دمایی مطابق با معادله (۲-۳) بدست می‌آید.

۲-۲-۶- ثبات VT SET-UP

ثبات VT SET_UP برای تنظیمات اولیه حالت ولتاژ/دما استفاده می‌شود. این ثبات می‌تواند توسط Master به طریق ارتباط دو سیم خوانده و نوشته شود. آدرس دسترسی به این ثبات 0x08 است و دارای مقدار پیش فرض 0x00 می‌باشد (جدول (۶-۱۰)).

جدول (۶-۱۰): ثبات VT SET-UP

بیت	بیت ۰	بیت ۱	بیت ۲	بیت ۳	بیت ۴	بیت ۵	بیت ۶	بیت ۷
نام بیت	VTCHOP	VTSHORT	-	-	EXTREF	VTMD0	VTMD1	VTEN
پیش فرض	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰

توسط بیت VTEN این ثبات، مد ولتاژ/دما مدار مجتمع AD7745/46 فعال می‌گردد. به وسیله ترکیب بیت‌های VTMD0 و VTMD1 پیکربندی مد ولتاژ/دما مشخص می‌شود (جدول (۶-۱۱)).

جدول (۶-۱۱): پیکربندی مد ولتاژ/دما

VTMD1	VTMD0	کانال ورودی
۰	۰	سنسور دمای داخلی
۰	۱	سنسور دمای خارجی
۱	۰	پایش V_{DD}
۱	۱	ورودی ولتاژ خارجی

برای استفاده از مرجع ولتاژ خارجی وصل شده به پایه‌های REFIN(+) و REFIN(-)، برای حالت‌های ولتاژ ورودی یا پیش V_{DD} ، باید بیت EXTREF یک شود. در صورت استفاده از مرجع ولتاژ داخلی باید این بیت صفر گردد. برای عملکرد ولتاژ/جریان بیت VTCHOP باید یک گردد.

ثبات CONFIGURATION - ۳-۲-۶

این ثبات در بخش (۳-۳-۱-۵) توضیح داده شده است. اما بیت‌های VTF1 و VTF0 برای کانال ولتاژ/دما می‌باشد که در این قسمت بیان می‌گردد.

ترکیبات این دو بیت زمان تبدیل و نرخ بروزسانی مد ولتاژ/دما را مشخص می‌کند (جدول (۶-۱۲)).

جدول (۶-۱۲): نرخ بروزسانی و زمان تبدیل

VTF1	VTF1	VTCHOP=1		
		زمان تبدیل (ms)	نرخ بروزسانی (Hz)	فرکانس -3dB (Hz)
۰	۰	۲۰/۱	۴۹/۸	۲۶/۴
۰	۱	۳۲/۱	۳۱/۲	۱۵/۹
۱	۰	۶۲/۱	۱۶/۱	۸/۰
۱	۱	۱۲۲/۱	۸/۲	۴/۰

هنگامی که بیت CLKCTRL ثبات SET-UP EXC صفر باشد، نرخ بروزسانی مطابق جدول (۶-۱۲) می‌باشد. اگر بیت CLKCTRL یک گردد، زمان تبدیل طولانی‌تر می‌شود.

ثبات کالیبراسیون بهره ولتاژ/جریان - ۴-۲-۶

این ثبات ۱۶ بیتی می‌باشد و می‌تواند توسط Master به طریق ارتباط دو سیم خواننده و نوشته شود. آدرس‌های دسترسی به این ثبات 0x11 و 0x12 است و داری مقدار پیش فرض 0XXXX می‌باشد. این ثبات ضریب کالیبراسیون کارخانه تمام مقیاس کانال ولتاژ را در خود نگهداری می‌کند.

مراجع

- [۱] N. Pierdicca, L. Pulvirenti, and C. Bignami, "Soil moisture estimation over vegetated terrains using multitemporal remote sensing data," *Remote Sensing of Environment*, vol. 114(2), pp. 440-448, 2010.
- [۲] B. Will and I. Rolfes, "A miniaturized soil moisture sensor based on time domain transmissometry," *Sensors Applications Symposium (SAS)*, pp. 233-236, 2014.
- [۳] م. کشاورزی حسن آباد، همکاران، "تاثیر بافت خاک بر دقت روش انعکاس سنجی حوزه زمانی در برآورد رطوبت خاک، ۱۴-۲۳."
- [۴] قنادزاده، داوری، کامران، قهرمان، "ارزیابی ساختمان های مختلف بلوک گچی برای تعیین رطوبت خاک،" پژوهش آب ایران، ۲(۳)، ۲۳-۳۲، ۲۰۰۹.
- [۵] V. S. Palaparthi, S. U. Lekshmi, J. John, S. Sarik, M. S. Bhagini, and D. N. Singh, "Soil Moisture Measurement System for DPHP Sensor and In Situ Applications," *Electronic System Design (ISED)*, pp. 11-15, 2013.
- [۶] D. A. Robinson, C. S. Campbell, J. W. Hopmans, B. K. Hornbuckle, S. B. Jones, R. Knight, et al., "Soil moisture measurement for ecological and hydrological watershed-scale observatories: A review," *Vadose Zone Journal*, vol. 7(1), pp. 358-389, 2008.
- [۷] L. J. Briggs, "The mechanics of soil moisture/By Lyman J. Briggs," 1897.
- [۸] K. Terzaghi, *Theory of Consolidation*: Wiley Online Library, 1943.
- [۹] A. Standard, "D2216: Standard test methods for laboratory determination of water (moisture) content of soil and rock by mass," *ASTM International*, West Conshohocken, PA, 2010.
- [۱۰] D. Hillel, *Introduction to soil physics*: Academic press, 2013.
- [۱۱] T. Terhoeven-Urselmans, H. Schmidt, R. G. Joergensen, and B. Ludwig, "Usefulness of near-infrared spectroscopy to determine biological and chemical soil properties: Importance of sample pre-treatment," *Soil Biology and Biochemistry*, vol. 40(5), pp. 1178-1188, 2008.
- [۱۲] F. S. Zazueta and J. Xin, "Soil moisture sensors," *Soil Sci*, vol. 73, pp. 391-401, 1994.
- [۱۳] N. S. Jayawardane, W. S. Meyer, and H. D. Barrs, "Moisture measurement in a swelling clay soil using neutron moisture meters," *Soil Research*, vol. 22(2), pp. 109-117, 1984.
- [۱۴] J. Li, D. W. Smith, and S. G. Fityus, "The effect of a gap between the access tube and the soil during neutron probe measurements," *Soil Research*, vol. 41(1), pp. 151-164, 2003.
- [۱۵] A. N. Elder and T. C. Rasmussen, "Neutron probe calibration in unsaturated tuff," *Soil Science Society of America Journal*, vol. 58(5), pp. 1301-1307, 1994.

- [١٦] A. Amoozegar, K. C. Martin, and M. T. Hoover, "Effect of access hole properties on soil water content determination by neutron thermalization," *Soil Science Society of America Journal*, vol. 53(2), pp. 330-335, 1989.
- [١٧] N. J. Jarvis and P. B. Leeds-Harrison, "Some problems associated with the use of the neutron probe in swelling/shrinkling clay soils," *Journal of soil science*, vol. 38(1), pp. 149-156, 1987.
- [١٨] F. Stephen, W. Tony, and H. Wenxiong, "Water content measurement in expansive soils using the neutron probe," pp. 1-10, 2011.
- [١٩] X. Guan and G. Chen, "The Measurement of soil moisture and density research and application design using the principle of dual-energy ϵ -rays transmission," *Electric Information and Control Engineering (ICEICE)*, pp. 844-847, 2011.
- [٢٠] E. T. Selig and S. Mansukhani, "Relationship of soil moisture to the dielectric property," *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, vol. 101, pp. 755-770, 1975.
- [٢١] G. C. Topp, J. L. Davis, and A. P. Annan, "Electromagnetic determination of soil water content using TDR: I. Applications to wetting fronts and steep gradients," *Soil Science Society of America Journal*, vol. 46(4), pp. 672-678, 1982.
- [٢٢] J. E. Campbell, "Dielectric properties and influence of conductivity in soils at one to fifty megahertz," *Soil Science Society of America Journal*, vol. 54(2), pp. 332-341, 1990.
- [٢٣] K. Arulanandan, "Dielectric method for prediction of porosity of saturated soil," *Journal of Geotechnical Engineering*, vol. 117(2), pp. 319-330, 1991.
- [٢٤] K. Kupfer, E. Trinks, N. Wagner, and C. Hübner, "TDR measurements and simulations in high lossy bentonite materials," *Measurement Science and Technology*, vol. 18(4), p. 1118, 2007.
- [٢٥] G. C. Topp, J. L. Davis, and A. P. Annan, "Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines," *Water resources research*, vol. 16(3), pp. 574-582, 1980.
- [٢٦] M. A. Hilhorst, "A pore water conductivity sensor," *Soil Science Society of America Journal*, vol. 64(6), pp. 1922-1925, 2000.
- [٢٧] B. Will and I. Rolfes, "Comparative study of moisture measurements by time domain transmissometry," *In SENSORS*, pp. 1-4, 2013.
- [٢٨] K. Noborio, "Measurement of soil water content and electrical conductivity by time domain reflectometry: a review," *Computers and electronics in agriculture*, vol. 31(3), pp. 213-237, 2001.
- [٢٩] R. Černý, "Time-domain reflectometry method and its application for measuring moisture content in porous materials: A review," *Measurement*, vol. 42(3), pp. 329-336, 2009.
- [٣٠] B. Will, "Time domain transmission sensors for soil moisture measurements," *Telecommunications Forum (TELFOR)*, pp. 16-19, 2011.

- [३१] W. R. Whalley, T. J. Dean, and P. Izzard, "Evaluation of the capacitance technique as a method for dynamically measuring soil water content," *Journal of agricultural engineering research*, vol. 52, pp. 147-155, 1992.
- [३२] M. Robinson and T. J. Dean, "Measurement of near surface soil water content using a capacitance probe," *Hydrological Processes*, vol. 7(1), pp. 77-86, 1993.
- [३३] C. M. K. Gardner, T. J. Dean, and J. D. Cooper, "Soil water content measurement with a high-frequency capacitance sensor," *Journal of Agricultural Engineering Research*, vol. 71(4), pp. 395-403, 1998.
- [३४] J. Minet, S. Lambot, G. Delaide, J. A. Huisman, H. Vereecken, and M. Vanclooster, "A generalized frequency domain reflectometry modeling technique for soil electrical properties determination," *Vadose Zone Journal*, vol. 9(4), pp. 1063-1072, 2010.
- [३५] N. Jorapur, V. S. Palaparthi, S. Sarik, J. John, M. S. Baghini, and G. K. Ananthasuresh, "A low-power, low-cost soil-moisture sensor using dual-probe heat-pulse technique," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 233, pp. 108-117, 2015.
- [३६] J. M. Tarara and J. M. Ham, "Measuring soil water content in the laboratory and field with dual-probe heat-capacity sensors," *Agronomy Journal*, vol. 89(4), pp. 535-542, 1997.
- [३७] G. J. Gaskin and J. D. Miller, "Measurement of soil water content using a simplified impedance measuring technique," *Journal of agricultural engineering research*, vol. 63(2), pp. 153-159, 1996.
- [३८] E. T. Engman and N. Chauhan, "Status of microwave soil moisture measurements with remote sensing," *Remote Sensing of Environment*, vol. 51(1), pp. 189-198, 1995.
- [३९] F. Jonard, L. Weihermüller, M. Schwank, H. Vereecken, and S. Lambot, "Soil moisture retrieval using L-band radiometer and ground-penetrating radar," pp. 3093-3096, 2011.
- [४०] O. P. N. Calla, D. Bohra, R. Vyas, B. S. Purohit, R. Prasher, A. Loomba, *et al.*, "Measurement of soil moisture using microwave radiometer," *Recent Advances in Microwave Theory and Applications*, pp. 621-624, 2008.
- [४१] Y.-A. Liou, Y. C. Tzeng, and K. S. Chen, "Soil moisture sensing by L-band radiometry for prairie grassland," *Geoscience and Remote Sensing Symposium Proceedings*, pp. 1846-1848, 1998.
- [४२] H. Ghedira, T. Lakhankar, N. Jahan, and R. Khanbilvardi, "Combination of passive and active microwave data for soil moisture estimates," *Geoscience and Remote Sensing Symposium*, vol. 4, pp. 2783-2786, 2004.
- [४३] T. Lakhankar, N. Krakauer, and R. Khanbilvardi, "Applications of microwave remote sensing of soil moisture for agricultural applications," *Int. J. Terraspace Sci. Eng.*, vol. 2(1), pp. 81-91, 2009.
- [४४] K. Das, P. K. Paul, and Z. Dobesova, "Present status of soil moisture estimation by microwave remote sensing," *Cogent Geoscience*, vol. 1(1), p. 1084669, 2015.

- [۴۵] R. S. Alessi and L. Prunty, "Soil-water determination using fiber optics," *Soil Science Society of America Journal*, vol. 50(4), pp. 860-863, 1986.
- [۴۶] A. L. Kaleita, L. F. Tian, and M. C. Hirschi, "Relationship between soil moisture content and soil surface reflectance," *Transactions of the ASAE*, vol. 48(5), pp. 1979-1986, 2005.
- [۴۷] C. Sayde, *et al.*, "Feasibility of soil moisture monitoring with heated fiber optics," *Water Resources Research*, vol. 46(6), 2010.
- [۴۸] A. Devices, "AD7746 datasheet," ed: May, 2005.
- [۴۹] A. Heidary, *A low-cost universal integrated interface for capacitive sensors*: TU Delft, Delft University of Technology, 2010.
- [۵۰] A. Datasheet", AVR Atmega16, Atmega16L Datasheet," *Atmel Corporation*, 2004.

[۵۱] آ. خورسندی, م. جعفری, م. صادقی, "اندازه‌گیری رطوبت و هدایت الکتریکی خاک با استفاده از روش خازنی," سومین کنفرانس دانشجویی مهندسی ماشین‌های کشاورزی, ۱۳۸۶.

Abstract

The purpose of this research is to design and make a system for measuring soil moisture. For this purpose, a method of measuring soil moisture based on varying dielectric of soil with varying moisture in it, is presented. The measurement tool includes two part, electric circuit and capacitive sensor. Capacitive sensor has two metal rods that have the role of electrodes of a capacitor. Capacitive sensor is placed inside the soil and the soil has the role of dielectric for this capacitor. The electric circuit includes AD7746 IC and ATmega16L micro controller. With varying soil moisture, capacitance of capacitor change and it is measured by AD7745/46. The measured capacitance is shown by a 24-bit data. Control of AD7746 and processing of its output data were done by ATmega16L. ATmega16L is programmed with CodeVision compiler. The results of the measurements are shown on a LCD display. By analyzing the capacitance of this capacitor, it is possible to estimate soil moisture.

Keywords: Soil Moisture, AD7745/46, ATmega16L, Capacitor Dielectric.



Faculty of electrical and robotic engineering

Msc.thesis in Digital Electronics

Measurement of soil moisture by AD7745_7746

By: Monireh Momeni

Supervisor:

Dr. Sasan Naseh

February 2016