



UCG

Univerzitet Crne Gore

UNIVERZITET CRNE GORE
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET

Trifun Savić

**RAZVOJ RJEŠENJA ZA REALIZACIJU SISTEMA ZA
PAMETNO NAVODNJAVANJE**

MAGISTARSKI RAD

Podgorica, 2017

PODACI I INFORMACIJE O MAGISTRANTU:

Ime i prezime: Trifun Savić

Datum i mjesto rođenja: 25.09.1992., Peć, Republika Srbija

Prethodno završene studije:

Elektrotehnički fakultet, osnovne akademske studije (180 ECTS), studijski program:
Elektronika, telekomunikacije i računari, 2014.

Elektrotehnički fakultet, specijalističke akademske studije (60 ECTS), studijski program:
Elektronika, 2015.

INFORMACIJE O MAGISTARSKOM RADU:

Fakultet: Elektrotehnički fakultet

Studijski program: Elektronika, telekomunikacije i računari

Smjer: Elektronika

Naslov rada: RAZVOJ RJEŠENJA ZA REALIZACIJU SISTEMA
ZA PAMETNO NAVODNJAVANJE

Mentor: doc. dr Milutin Radonjić

UDK, OCJENA I ODBRANA MAGISTRASKOG RADA:

Datum prijave magistarskog rada: 07.10.2016.

Datum sjednice Vijeća na kojoj je prihvaćena tema: 27.01.2017.

Komisija za ocjenu teme i podobnosti kandidata:

1. prof. dr Igor Radusinović
2. doc. dr Milutin Radonjić
3. prof. dr Božo Krstajić

Komisija za ocjenu rada:

1. prof. dr Igor Radusinović
2. doc. dr Milutin Radonjić
3. prof. dr Božo Krstajić

Komisija za odbranu rada:

1. prof. dr Igor Radusinović
2. doc. dr Milutin Radonjić
3. prof. dr Božo Krstajić

Datum odbrane:

Datum promocije: _____

Sadržaj

Sažetak	2
Abstract	3
1 Uvod	4
2 Karakteristike zemljišta značajne za proces navodnjavanja.....	6
2.1 Fizičke osobine zemljišta	6
2.2 Vodne osobine zemljišta	9
2.3 Zapreminski procenat vlažnosti i potencijal vlažnosti zemljišta.....	12
2.4 Izračunavanje norme navodnjavanja	18
3 Hardverska osnova sistema za pametno navodnjavanje.....	20
3.1 Mikrokontrolerska platforma	21
3.1.1 Osnovno o mikrokontrolerima	21
3.1.2 Pregled nekih popularnih mikrokontrolerskih <i>open source</i> platformi	26
3.1.3 Libelium Waspote open source razvojna platforma.....	29
3.2 Bežična senzorska mreža.....	38
3.2.1 Karakteristike bežične senzorske mreže	40
3.2.2 ZigBee bežične senzorske mreže	42
3.3 GSM/GPRS komunikacija	46
3.3.1 Waspote GSM/GPRS modul SIM900.....	46
4 Algoritam za donošenje odluke o aktiviranju sistema za navodnjavanje.....	49
4.1 Automatizovana kontrola procesa navodnjavanja.....	53
4.1.1 Opis funkcionalnosti sistema za automatizovanu kontrolu procesa navodnjavanja	63
4.1.2 Konfiguracija sistema putem SMS komandi.....	70
4.2 Algoritam za pametno navodnjavanje	79
5 Zaključak	94
6 Literatura	96

Sažetak

Pravilno navodnjavanje ratarskih kultura je jedan od najvažnijih aspekata od značaja za prinos i kvalitet proizvoda. Ukoliko biljka ne dobija dovoljnu količinu vlage u zemljištu, ona se suši i vene. Sa druge strane, prevelika vlaga pogoduje razvoju biljnih bolesti, a i nepotrebnim navodnjavanjem se neracionalno troše vodni resursi. Stoga, u ovom radu su sprovedena istraživanja iz oblasti implementacije savremenih mikrokontrolerskih platformi, realizacije komunikacionih sistema i kreiranja algoritma za tzv. pametno navodnjavanje zemljišta, sa ciljem realizacije sistema koji će primjenom optimalnog navodnjavanja obezbijediti povećanje prinosa i kvaliteta ratarskih proizvoda.

U tom kontekstu, korišćenjem savremenih mikrokontrolerskih platformi realizovan je centralni dio sistema za pametno navodnjavanje, i ujedno omogućena interakcija sa korisnikom. Takođe, realizovan je senzorski čvor za mjerenje vlažnosti zemljišta i temperature vazduha na proizvodnoj parceli. Implementacijom bežične senzorske mreže, obezbijeđeno je povezivanje senzorskih čvorova sa centralnom jedinicom sistema, dok je korišćenjem GSM/GPRS komunikacije omogućeno konfigurisanje sistema putem SMS komandi i njegovo povezivanje sa *cloud* platformom. Primjenom multidisciplinarnog istraživanja, realizovan je i algoritam za pametno navodnjavanje. Na osnovu ulaznih parametara, određenih analizom zemljišta, i parametara dobijenih od strane senzorskih čvorova, algoritam autonomno određuje optimalne periode za navodnjavanje.

Rezultat ovog magistarskog rada je razvijen funkcionalni prototip sistema za pametno navodnjavanje, instaliran u realnim uslovima proizvodne poljoprivredne parcele. Na osnovu eksperimentalnih rezultata dobijenih na ovom prototipu, u toku višemjesečnog rada, sistem je dokazao pouzdanost, i uspješnu realizaciju željenih funkcionalnosti.

Predloženi sistem nalazi važnu primjenu u agrikulturi, kod uzgajanja različitih kultura biljaka, na različitim tipovima zemljišta, povećavajući prinos i kvalitet uz optimalnu potrošnju vode. Sistem ovakvog tipa daje prostor za dalje unapređenje i poboljšanje, a sličan koncept tzv. pametne kontrole uređaja može se primijeniti i u drugim oblastima istraživanja i primjene.

Ključne riječi: pametno navodnjavanje, multidisciplinarno istraživanje, mikrokontrolerski sistemi, komunikacione tehnologije, internet stvari.

Abstract

Proper irrigation of crops is one of the most important aspects of the yield and product quality. If the plant does not get enough moisture in the soil, it dries and veins. On the other hand, too much moisture allows the development of plant diseases, and unnecessary irrigation also drastically wastes water resources. Therefore, in this paper, we performed research in the field of implementation of modern microcontroller platforms, realization of communication systems and creation of algorithm for smart irrigation, with the aim of implementing a system that will ensure an increased yield and quality of agricultural products by applying optimal irrigation.

In this context, using modern microcontroller platforms, the central part of the system for smart irrigation was developed, and its interaction with the user is enabled. Also, the sensor node for measuring soil moisture and air temperature on the agricultural field has been implemented. Using Wireless Sensor Network, the connection and data transfer between the sensor nodes and the central unit of the system is enabled. Using GSM/GPRS communication, it is possible to configure the system via SMS commands and transfer the system's data to the cloud platform. Applying the multidisciplinary research, an intelligent irrigation algorithm was implemented. Based on the input parameters, determined by soil analysis, and obtained by the sensor nodes, the algorithm autonomously determines the optimal periods for irrigation.

The outcome of this master thesis is the development of a functional prototype of the system for smart irrigation, installed in real-life conditions of the agricultural field. Based on the experimental results with this prototype, during several months of work, the system proved a reliability and functionality.

The proposed system finds an important application in agriculture, in the cultivation of different plant cultures, on different types of soil, increasing yield and quality with optimal water consumption. A system of this type gives a lot of opportunities for further work and improvement, and a similar concept of the smart control can also be applied in other areas of research and application.

Keywords: smart irrigation, multidisciplinary research, microcontroller systems, communication technologies, internet of things.

1 Uvod

Konstantan rast ljudske populacije, sve veći zahtjevi za hranom i energijom, zajedno sa konkurencijom između različitih potrošača svježe vode, uzrokuju neracionalnu potrošnju vodnih resursa [1]. Pored toga, efekti globalnih klimatskih promjena, i drugih ekoloških i ekonomskih problema uzrokuju dalje komplikacije u vezi sa upravljanjem vodnim resursima. Ovi problemi predstavljaju veliku prepreku razvoju održive poljoprivrede, koja predstavlja jedan od vodećih potrošača vode na globalnom nivou. Kako je svježa voda dominantan faktor svake poljoprivredne proizvodnje i pratećih aktivnosti, potrebne su različite strategije i akcije kako bi se obezbijedilo očuvanje resursa svježe vode širom svijeta.

Potrebe za vodom mogu varirati u zavisnosti od vrste biljke i mjesta na kom se uzgaja. Postoji mnogo faktora koji utiču na količinu vlage u zemljištu, a neki od njih su: količina padavina, temperatura, kvalitet zemljišta, itd [2]. Za idealne uslove uzgoja, vlažnost zemljišta ne bi smjela da padne ispod 50% u zoni korjenovog sistema biljke [3]. Sistem poljoprivredne proizvodnje se dominantno snabdijeva vodom na dva načina: putem prirodnih padavina i navodnjavanjem. Poljoprivredna proizvodnja čije se snabdijevanje vodom vrši putem prirodnih padavina čini dominantan način proizvodnje u svijetu. Oko 80% obradivog zemljišta za uzgoj različitih kultura širom svijeta oslanja se na prirodne padavine [4]. Vremenski uslovi i različite karakteristike zemljišta često uzrokuju neadekvatnu dostupnost vlage, a tehnike za poboljšanje dostupnosti vode (kao što je sakupljanje vode) su skupe [5]. Sa druge strane, snabdijevanje vodom putem navodnjavanja je daleko produktivnije i brzo se razvija u proteklim godinama. Međutim, većina poljoprivrednih gazdinstava navodnjavanje vrši znatno ispod njihovog potencijala, i tu postoji značajan prostor za poboljšanje postojećih i razvoj novih sistema za navodnjavanje koji će omogućiti racionalnije korišćenje vode i uz to povećati količinu i kvalitet prinosa.

U ovom magistarskom radu predložen je sistem za tzv. pametno navodnjavanje zemljišta baziran na upotrebi savremenih ICT (eng. *Information and Communication Technology*) tehnologija. Radi se o multidisciplinarnom istraživanju u okviru koga se razvija autonomni sistem koji ima mogućnost da, na osnovu prikupljenih podataka o najvažnijim parametrima zemljišta i ambijentalnih uslova, samostalno donosi odluku o uključivanju odnosno isključivanju sistema za navodnjavanje. Realizovani sistem autonomno određuje kada i koliko količinu vode treba predati zemljištu. Glavni akcenat u radu je stavljen na implementaciji algoritma za pametno navodnjavanje, koji na osnovu informacija o izmjerenoj vlažnosti zemljišta i temperaturi vazduha, samostalno određuje optimalne periode navodnjavanja. Prikupljanje ovih informacija obezbijeđeno je posredstvom bežične senzorske mreže (eng. *Wireless Sensor Network* – WSN), čiji senzorski čvorovi obrađuju izmjerene podatke i prosleđuju ih glavnoj kontrolnoj jedinici. Pored algoritma za pametno navodnjavanje realizovana je i mogućnost da korisnik preuzme (trenutno ili u određenom periodu) kontrolu

nad sistemom. U ovom režimu rada korisnik može da izabere trenutke početka i kraja navodnjavanja, koje se nakon toga automatski odvija unutar zadatih intervala. Dakle, omogućena je fleksibilna kontrola procesa navodnjavanja podešavanjem vremenskog rasporeda aktivacije/deaktivacije ventila.

Rad je organizovan u pet poglavlja. Nakon uvodnih razmatranja u kojima je data motivacija za izradu rješenja sistema pametnog navodnjavanja, drugo poglavlje je posvećeno karakteristikama zemljišta koje su od važnosti za donošenje odluka o navodnjavanju. U okviru ovog poglavlja prikazan je način određivanja vlažnosti zemljišta kao i izračunavanje norme navodnjavanja, koja predstavlja jedan od ulaznih parametara algoritma za pametno navodnjavanje. U trećem poglavlju prikazana je hardverska osnova sistema za pametno navodnjavanje, koja se sastoji od mikrokontrolerske platforme i komunikacionih sistema koji ovu platformu povezuje sa perifernim elementima sistema. Date su osnovne karakteristike mikrokontrolera, neke popularne *open source* mikrokontrolerske platforme, kao i detaljan opis platforme korišćene za izradu predloženog sistema. U okviru ovog poglavlja su još prikazana dva komunikaciona sistema. Jedan komunikacioni sistem je namijenjen razmjeni podataka između senzorskih čvorova i centralne jedinice, realizovan na bazi bežične senzorske mreže. Drugi komunikacioni sistem je namijenjen komunikaciji centralne jedinice sa *cloud* platformom, kao i za interakciju sa korisnikom. Četvrto poglavlje posvećeno je praktičnoj realizaciji predloženog rješenja. Prikazan je način realizacije automatizovanog režima rada sistema sa detaljnim opisom funkcionalnosti. Nakon toga, objašnjeno je konfigurisanje sistema putem SMS komandi, gdje je prikazan način kodiranja komandi kao i prijem i obrada istih na glavnoj kontrolnoj jedinici. Na kraju ovog poglavlja predstavljen je algoritam za pametno navodnjavanje. Zaključna razmatranja data su u petom poglavlju.

2 Karakteristike zemljišta značajne za proces navodnjavanja

Pravilno navodnjavanje ratarskih kultura je jedan od najvažnijih aspekata od značaja za prinos i kvalitet proizvoda. Ukoliko biljka ne dobija dovoljnu količinu vlage u zemljištu, ona se suši i vene. Sa druge strane, prevelika vlaga pogoduje razvoju biljnih bolesti. Takođe, nepotrebnim navodnjavanjem se neracionalno troše vodni resursi. Kroz multidisciplinarno istraživanje, povezujući istraživanja iz oblasti melioracija i informaciono-komunikacionih tehnologija, moguće je doći do rješenja koje će dati bolje rezultate u odnosu na do sada poznata rješenja.

Naredna poglavlja biće posvećena karakteristikama zemljišta koje su od važnosti za proces navodnjavanja. Cilj izlaganja materije u ovim poglavljima je da se približi problematika vezana za fizičke i vodne osobine zemljišta, a što je neophodno za pravilno donošenje odluka o navodnjavanju. Takođe, biće opisano određivanje zapreminskog procenta vlažnosti i potencijala vlažnosti zemljišta, kao i izračunavanje norme navodnjavanja, tj. optimalne količine vode koja se dovodi na proizvodnu parcelu u jednom navodnjavanju, a predstavlja jedan od ulaznih parametara algoritma koji će biti primijenjen za tzv. pametno navodnjavanje.

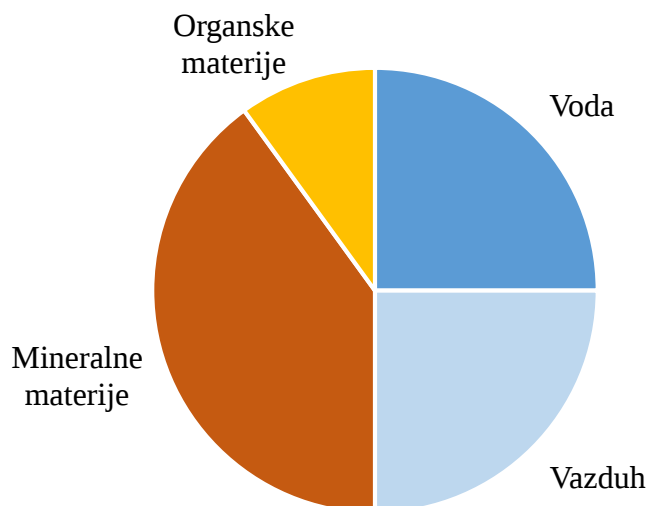
2.1 Fizičke osobine zemljišta

Zemljište možemo definisati kao površinski sloj Zemljine kore, sačinjen od mineralnog dijela nastalog raspadanjem i dekompozicijom matičnog supstrata pod uticajem fizičkih, hemijskih i bioloških procesa, i organskog dijela razložene i transformisane organske materije i ostataka različitih mikroskopskih i makroskopskih živih organizama [6].

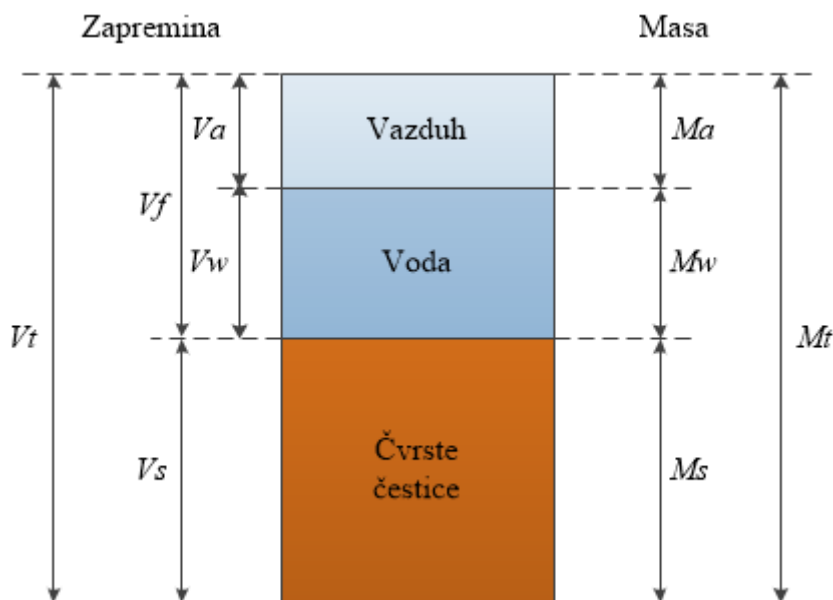
Zemljište je složen, polidisperzivni sistem sačinjen od tri faze:

- Čvrsta (čestice čvrstog agregatnog stanja)
- Tečna (voda u zemljištu koja uvijek sadrži druge rastvorene materije čvrste i gasovite faze)
- Gasovita (vazduh zemljišta)

Relativna proporcija ovih faza u zemljištu nije konstantna i mijenja se u zavisnosti od: vremenskih uslova, vegetacije i antropogenog uticaja. Šematski prikaz, odnosa zapremina faza zemljišta, u uslovima optimalnim za gajenje biljaka, dat je na slici 2.1. Na slici 2.2, dat je dijagram zemljišta kao trofaznog sistema. Mase faza zemljišta na grafiku prikazane su sa desne strane: masa vazduha Ma , koja je zanemarljiva u odnosu na masu tečne i čvrste faze; masa tečne faze Mw ; masa čvrste faze Ms ; kao i ukupna masa sve tri faze Mt . Zapremine faza zemljišta prikazane su sa lijeve strane dijagrama: zapremina vazduha Va ; zapremina tečne faze Vw , zapremina pora $Vf = Va + Vw$; zapremina čvrste faze Vs ; i ukupna zapremina faza Vt .



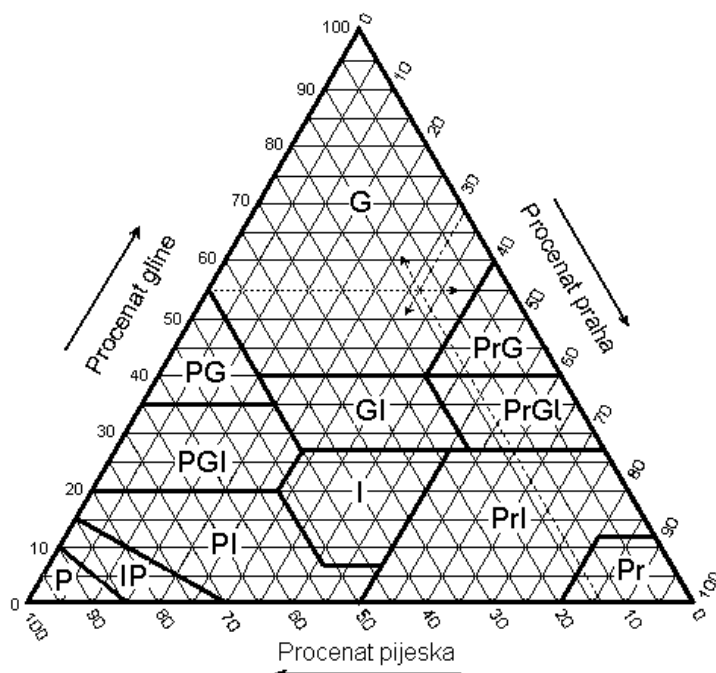
Slika 2.1 Šematski prikaz odnosa zapremina faza zemljišta, u uslovima optimalnim za uzgoj biljaka



Slika 2.2 Šematski dijagram zemljišta kao trofaznog sistema

Među najbitnijim fizičkim osobinama zemljišta ubrajaju se: tekstura, struktura, poroznost, gustina i električna otpornost.

Tekstura zemljišta odnosi se na veličinu čestica koje se nalaze u zemljištu. Određena je odnosom masa tri tipa čestica: pijeska, praha i gline. Zemljišta sa različitom raspodjelom i relativnom proporcijom ovih čestica čine različite klase zemljišta, što je grafički prikazano na slici 2.3.



Slika 2.3 Trougao za određivanje teksturnih klasa tla, *US-Soil-Taxonomy*:

G – glina, PG – pjeskovita glina, PrG – praškasta glina, GI – glinovita ilovača, PrGI – praškasto glinovita ilovača, PGI – pjeskovito glinovita ilovača, I – ilovača, PrI – praškasta ilovača, Pr – prah, IP – ilovasti pijesak, P – pijesak, PI – pjeskovita ilovača [7].

Struktura predstavlja organizaciju i raspodjelu čestica u zemljištu. Odnosi se na grupe čestica koje se povezuju u konstrukcije različitih veličina i oblika, koje se nazivaju agregati zemljišta. Agregat čine čvrsta materija i pore. Dominanto ih grade čestice gline, a takođe mogu posjedovati čestice pijeska i praha. Raspodjela ovih agregata u različite forme daje zemljištu odgovarajuću strukturu [8].

Gustina zemljišta se može posmatrati kroz tri najčešće izučavana pojma kod analize tri faze zemljišta, a to su: gustina čvrste faze (srednja gustina čvrstih čestica), volumna ili zapreminska specifična gustina tj. gustina suvog dijela zapremine zemljišta i ukupna gustina (gustina vlažnog dijela zapremine zemljišta).

Gustina čvrste faze ρ_s izračunava se po sljedećoj formuli:

$$\rho_s = \frac{Ms}{Vs}$$

gdje su Ms i Vs masa čvrste faze i zapremina čvrste faze, respektivno.

Volumna ili zapreminska specifična gustina je gustina 1 cm^3 tla u prirodnom stanju, tj. sa njegovim porama tj. ρ_b predstavlja odnos mase čvrstih čestica u ukupnoj zapremini zemljišta (pore i čvrste čestice) i izračunava se kao:

$$\rho_b = \frac{Ms}{Vs} = \frac{Ms}{(Vs + Va + Vw)}$$

Poroznost zemljišta predstavlja zapreminu zemljišta koju čine pore. Odnosi se na dio ukupne zapremine zemljišta koju čine voda i vazduh. Može se definisati i kao indeks relativnog prostora koji čine pore u zemljištu. Vrijednost ovog indeksa obično iznosi od 0.3 do 0.6 (30-60%). Poroznost direktno zavisi od teksture i strukture zemljišta. Tekstura određuje ukupnu zapreminu najmanjih pora, dok struktura utiče na pore većih veličina, čime se direktno utiče na vodno – vazdušni režim zemljišta [9]. Poroznost f se izračunava po sljedećoj formuli:

$$f = \frac{Vf}{Vt} = \frac{(Va + Vw)}{(Va + Vw + Vs)}$$

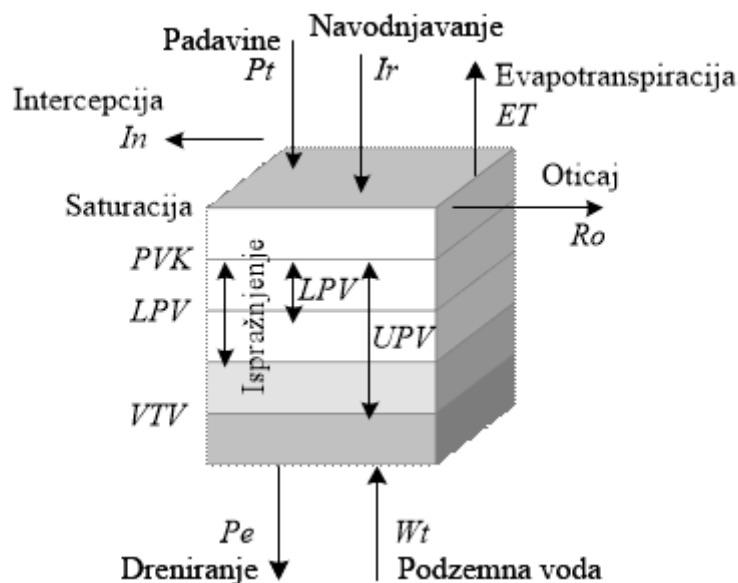
Električna otpornost u najvećoj mjeri zavisi od sadržaja vlage u zemljištu, a takođe i od fizičkih osobina zemljišta. Ona može biti mjera za određivanje sadržaja vlage u zemljištu, i određuje se umetanjem para elektroda u zemljište. Ove elektrode su obično umetnute u neki porozni materijal (gips, najlon, stakleno vlakno) koji simulira uzorak zemljišta. Mogu se koristiti i za određivanje tenzije (sila potrebna da bi biljka crpjela vodu iz zemljišta).

2.2 Vodne osobine zemljišta

Vodni bilans nekog područja, odražava postojeće odnose u prirodi između prihoda i rashoda vode i predstavlja karakteristiku vodnih resursa tog područja. Vodni bilans zemljišta u suštini predstavlja skup svih komponenata prihoda i rashoda vode u zemljištu za određeni vremenski interval [10] (slika 2.4). Za izračunavanje vodnog bilansa u zemljištu, kao promjenu sadržaja vlage u vremenu ($\frac{dW}{dt}$), koristi se sljedeća formula:

$$\frac{dW}{dt} = Pt + Ir + Wt - In - Ro - Pe - E\gamma - T\gamma$$

gdje: Pt označava padavine (mm), Ir je voda dodata navodnjavanjem (mm), Wt prihod kapilarnim izdizanjem (mm), In predstavlja vodu koja se zadržava intercepcijom (mm), Ro predstavlja površinski oticaj (mm), Pe gubitak vode koji se javlja dubokom perkolacijom (mm), $E\gamma$ predstavlja evaporaciju (mm) i $T\gamma$ označava transpiraciju (mm) [11].



Slika 2.4 Vodni bilans zemljišta

Na slici 2.4 prikazani su neki parametri vodnih osobina zemljišta:

- Saturacija – maksimalna količina vode u zemljištu, tj. poroznost.
- PVK (poljski vodni kapacitet) – predstavlja količinu vode koja ostane u zemljištu nakon što se ocijedi gravitaciona voda.
- VTV (vlažnost trajnog venuća) – odnosi se na količinu vode u zemljištu kada biljka trajno vene.
- UPV (ukupna pristupačna voda) – predstavlja vodu koju biljka može koristiti za svoje fiziološke potrebe (razlika u sadržaju vlage između PVK i VTV).
- LPV (lako pristupačna voda) – je maksimalna količina vode koja se može usvojiti od strane biljke iz zone korjenovog sistema, a da biljka ne dospije u uslove stresa. U ovom opsegu vlažnosti zemljišta biljke dobijaju optimalnu količinu vode za najbolji prinos.

Vodni bilans u zemljištu može se odrediti za kompletnu efektivnu dubinu korjenovog sistema uključujući i prihode od padavina i/ili navodnjavanja i isparavanja iz površinskih slojeva [12]. Količina vode koja se nalazi u zoni korjenovog sistema može se takođe izraziti i kao nedostatak ili višak vode, tj. kao deficit ili suficit u zoni korjenovog sistema. Ako deficit vode u zoni korjenovog sistema raste, trenutni sadržaj vlage u zemljištu opada.

Zemljište usvaja vodu na tri načina: putem padavina, kapilarnim izdizanjem (podzemne vode) i navodnjavanjem.

Padavine igraju dominantnu ulogu u snabdijevanju zemljišta vodom.. Ukoliko nema dovoljno padavina, potrebe biljaka za vodom nadoknađuju se navodnjavanjem.

Kapilarno izdizanje je dobro poznati fenomen (vezan za zemljišta koja nisu zasićena vodom) koji opisuje kretanje pora sa vodom iz donjih slojeva zemljišta u gornje slojeve, suprotno gravitacionoj sili. Ovaj proces se dešava kada su adhezivne sile između molekula

tečnosti (vode) i pora (prostora između čvrstih čestica) u zemljištu jače od kohezivnih sila unutar molekula vode. Što je manji prostor između čestica zemljišta to je visina kapilarnog izdizanja veća.

Koncept potreba biljaka za vodom nastao je kada se uvidjela zavisnost prinosa biljaka od količine dodate vode. Neophodno je procijeniti količine vode kojom se trebaju snabdijevati biljke navodnjavanjem, radi povećanja i poboljšanja biljne proizvodnje. Navodnjavanjem se obezbjeđuje optimalna količina vode u skladu sa potrebama biljke. Ove potrebe za vodom definišu se kao debljina sloja vode (mm) koja je potrebna da se doda biljkama, radi nadoknađivanja manjka vode u potpunosti. Zalihe vode u zemljištu, kiša, kao i voda koja dolazi u zonu korjenovog sistema kapilarnim izdizanjem smanjuju potrebe za navodnjavanjem [11]. Raspored zalivanja obuhvata norme i vrijeme zalivanja. Uzimajući u obzir sve relevantne faktore: biljku, upravljanje sistemima i ograničenje u vodnim i zemljišnim resursima, obezbjeđuju se optimalni prinosi [13].

Kao što se može vidjeti na slici 2.4, oslobađanje vode iz zemljišta vrši se na više načina: evapotranspiracijom, dreniranjem, površinskim oticanjem i intercepcijom.

Kombinacija dva različita procesa kada se voda oslobađa, sa površine zemljišta evaporacijom i od strane usjeva transpiracijom, naziva se evapotranspiracija (*ET*) [14]. Evaporacija i transpiracija javljaju se istovremeno i ne postoji jednostavan način razlikovanja ova dva procesa. Osim dostupnosti vode u gornjem sloju zemljišta, isparavanje iz zemljišta uglavnom određuje i dio sunčevog zračenja koje dolazi u dodir sa površinom zemljišta. Uticaj zračenja se smanjuje kako se vegetacija kulture razvija, a samim tim prekriva veći dio površine zemljišta. Kada je usjev mali, voda se uglavnom gubi evaporacijom, ali kada se je usjev razvije i potpuno prekrije zemljište, transpiracija postaje glavni proces. U toku sjetve gotovo 100% *ET* dolazi iz evaporacije, dok kod potpunog razvoja usjeva više od 90% *ET* dolazi iz transpiracije. Evapotranspiracija kulture je evapotranspiracija sa zdravih biljaka, dobro obezbijedenih sa hranljivim materijama, gajenih na većoj površini, pod optimalnim klimatskim uslovima i koje ostvaruju optimalnu proizvodnju [15].

Drenažom se gubi ona količina vlage u zemljištu koja se nalazi između vlažnosti pri poljskom vodnom kapacitetu (*PVK*) i vlažnosti saturacije. Kada nivo vlage u zemljištu opadne do vrijednosti poljskog vodnog kapaciteta dreniranje zemljišnog profila se zaustavlja.

Površinski oticaj je uklanjanje viška vode sa površine zemljišta. To se obično postiže plitkim kanalima, koji se takođe nazivaju poljski kanali. Plitki kanali se povezuju u veće i dublje odvodne kanale. Da bi se olakšao protok viška vode sa površine prema odvodima, zemljište se ravna da bi se obezbijedio vještački nagib [16].

Intercepcija se odnosi na onu količinu vode koja ne stigne do zemljišta. Ova voda zadržava se na lišću i granama biljaka takođe i na površinskoj vegetaciji. To su uglavnom padavine koje ne dopiju na površinski sloj zemljišta.

Veoma je bitno odrediti optimalnu količinu vode koja je potrebna biljci, pri datim uslovima i sastavu zemljišta. Velika količina vode može izazvati stres kod biljaka. Ovaj negativan uticaj vode na biljku dešava se kada je zona korjenovog sistema prevlašena. Stres

areacije ukazuje na to koliko je biljka osjetljiva na prevlaživanje. Takođe, ukazuje na to kada će biljka redukovati svoju transpiraciju uslijed nedostatka aerobnih uslova i pri kojoj vrijednosti vlažnosti zemljišta. U veoma vrelim i sušnim klimatskim uslovima biljka dolazi u stresno stanje. Ovo stanje može nastupiti čak i kod zemljišta koja su dobro snabdjevena vodnim resursima.

Dakle, potrebno je biljkama obezbijediti onu količinu vode u zemljištu da biljka ne bi dospjela u uslove stresa i da bi imala najbolji prinos. Iz tog razloga, količina vlage u zemljištu treba da se kreće između granica poljskog vodnog kapaciteta (PVK) i lako pristupačne vode (LPV), odnosno, ne treba dozvoliti da količina vlage u zemljištu padne ispod granice lako pristupačne vode.

2.3 Zapreminski procenat vlažnosti i potencijal vlažnosti zemljišta

Za izračunavanje količine vlage koja se nalazi u zemljištu mogu se koristiti različiti metodi. Vlažnost zemljišta moguće je utvrditi laboratorijski ili korišćenjem različitih tipova senzora. Direktna metoda mjerenja količine vlage u zemljištu zahtijeva uzorkovanje zemljišta, sušenje i mjerenje težine datog uzorka. Kod mjerenja vlažnosti korišćenjem senzora, količina vlage u zemljištu se indirektno određuje mjerenjem neke druge osobine zemljišta kao što su električna otpornost, dielektrična konstanta, itd. Kako je kod sistema za pametno navodnjavanje, koji je predložen u ovom radu, od velike važnosti brzina dobijanja informacija o vlažnosti zemljišta, jasno je da laboratorijsko mjerenje vlažnosti nije od koristi u ovoj implementaciji. Dakle, sistem za pametno navodnjavanje je implementiran korišćenjem senzora za mjerenje vlažnosti.

Kao dva najčešća načina za mjerenje i izračunavanje količine vlage u zemljištu korišćenjem senzora, u ovom poglavlju biće objašnjeni zapreminski procenat vlažnosti i potencijal vlažnosti zemljišta.

Zapreminski procenat vlažnosti zemljišta predstavlja količinu vode u zemljištu koja se predstavlja u procentima. Zapravo, zapreminski procenat vlažnosti ukazuje na to koliki je procenat vode u zemljištu, u odnosu na cjelokupnu zapreminu zemljišta (osim u procentima može se izraziti i kao m^3 / m^3). Ova mjera određivanja vlage u zemljištu u velikoj mjeri zavisi od tipa zemljišta. Na primjer, zemljište sa velikim procentom pijeska mnogo manje zadržava vodu nego glinovito zemljište. Razlog tome jesu čestice pijeska, koje zauzimaju veliki dio prostora zbog svoje veličine. Takođe, molekuli vode se zbog male specifične površine slabo vezuju za čestice pijeska, pa se velika količina vode odvodi drenažom uslijed djelovanja gravitacione sile.

Zapreminski procenat vlažnosti Q može se izračunati kao:

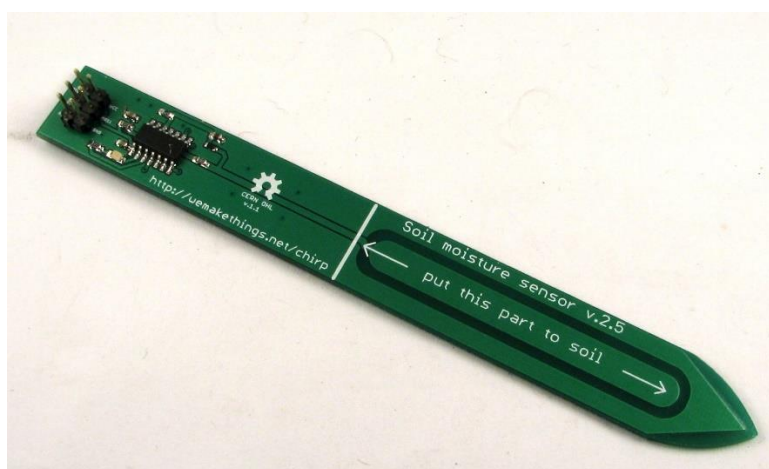
$$Q = \frac{V_w}{V_t}$$

gdje su V_w i V_t zapremina vode i totalna zapremina uzorka (čvrsta, tečna i gasovita faza), respektivno.

Za mjerenje zapreminskog procenta vlažnosti koriste se:

- FDR (eng. *Frequency Domain Reflectometry*),
- TDR (eng. *Time Domain Reflectometry*) senzori.

FDR senzori (slika 2.5) zasnivaju se na principu mjerenja promjene rezonantne frekvencije oscilovanja električne struje uslijed promjene kapacitivnosti između dvije elektrode. Promjena kapacitivnosti, tj. promjena dielektrične konstante, dešava se sa promjenom vlažnosti zemljišta. FDR elektrode izrađene su u obliku metalnih prstenova i postavljene jedna iznad druge.



Slika 2.5 FDR senzor

TDR senzori (slika 2.6) takođe koriste mjerenje dielektrične konstante za određivanje procenta vlažnosti u zemljištu. Ovi senzori koriste mikrotalasnu tehnologiju i šalju četvrtasti signal visoke frekvencije duž dvije paralelne sonde uronjene u zemljište. Signal stiže do kraja sonde i reflektuje se nazad prema senzoru. Vrijeme koje je potrebno signalu da od kraja sonde stigne nazad do senzora zavisi od dielektrične konstante, koja opet zavisi od količine vlage u zemljištu. Što je zemljište zasićenije vodom to će električni signal sporije putovati.



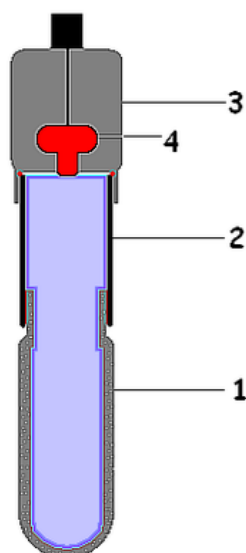
Slika 2.6 TDR senzor

Potencijal vlažnosti zemljišta (vodni potencijal), kao mjera za određivanje vlažnosti zemljišta, predstavlja podatak koliko lako biljka može ekstrahovati vodu iz zemljišta. Usvajanje i transport vode odvija se duž gradijenta vodnog potencijala: od mjesta sa višim (manje negativnim) ka mjestu sa nižim (više negativnim) potencijalom. Potencijal vlažnosti zemljišta se takođe naziva i tenzijom. Kada je zemljište saturisano, postoji puno vlage u porama zemljišta i oko čvrstih čestica. Time se korijenu biljke olakšava preuzimanje vode, odnosno potrebna je manja sila sukcije od strane biljke, a samim tim manja je i tenzija. Kada tenzija dostigne neku graničnu vrijednost, biljka više nije u mogućnosti da preuzme vodu iz zemljišta. Čak i ako ima vode u zemljištu, ona se zadržava na česticama zemljišta. Ova voda je nedostupna korijenu biljke. Kada tenzija dostigne ovu vrijednost biljka se izlaže stresu i počinje da vene sve dok se ne doda nova količina vode. Potencijal vlažnosti zemljišta izražava se u barima (bar) ili kilopaskalima (kPa).

Kod određivanja tenzije u zemljištu koriste se senzori čije su elektrode uronjene u neki blok poroznog materijala. Za mjerenje vlažnosti zemljišta koriste se dvije vrste senzora:

- Keramički,
- Gipsani.

Keramički senzori ili tenziometri (slika 2.7) na svom vrhu imaju poroznu keramičku ploču, dozvoljavajući da voda ulazi i izlazi iz komore u kojoj se skladišti voda unutar tenziometra. Kako se zemljište suši voda se silom sukcije izvlači iz tenziometra. Ovo stvara vakuum unutar cijevi senzora koji se mjeri vakummetrom.



Slika 2.7 Keramički senzor: 1 - keramička porozna kapica, 2 – cijev ispunjena vodom, 3 – vakummetar, 4 – vakummetarska igla

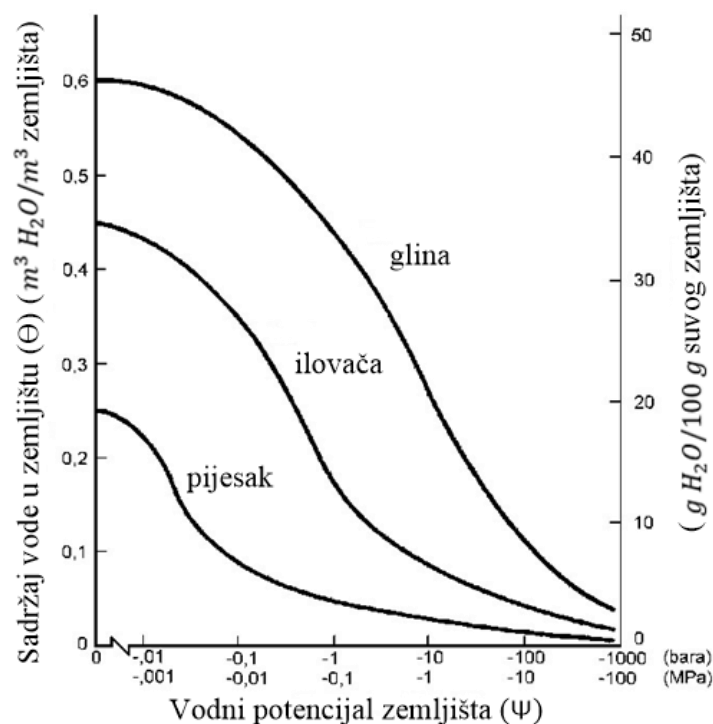
Gipsani senzori (slika 2.8) su napravljeni od gipsanog bloka, kroz koji voda iz okolnog zemljišta prolazi, simulirajući tako novi uzorak zemljišta. Unutar senzora su umetnute dvije elektrode. Oblik elektroda zavisi od oblika senzora odnosno gipsanog bloka. Kada gipsani blok dođe u dodir sa vodom, rastvara se i dozvoljava električnoj struji da teče između dvije elektrode. Promjenom količine vode mijenja se i otpor između elektroda. Ukoliko se zemljište suši, otpor se povećava i obratno. Da bi se električna otpornost konvertovala u tenziju koriste se odgovarajuće kalibracione jednačine.



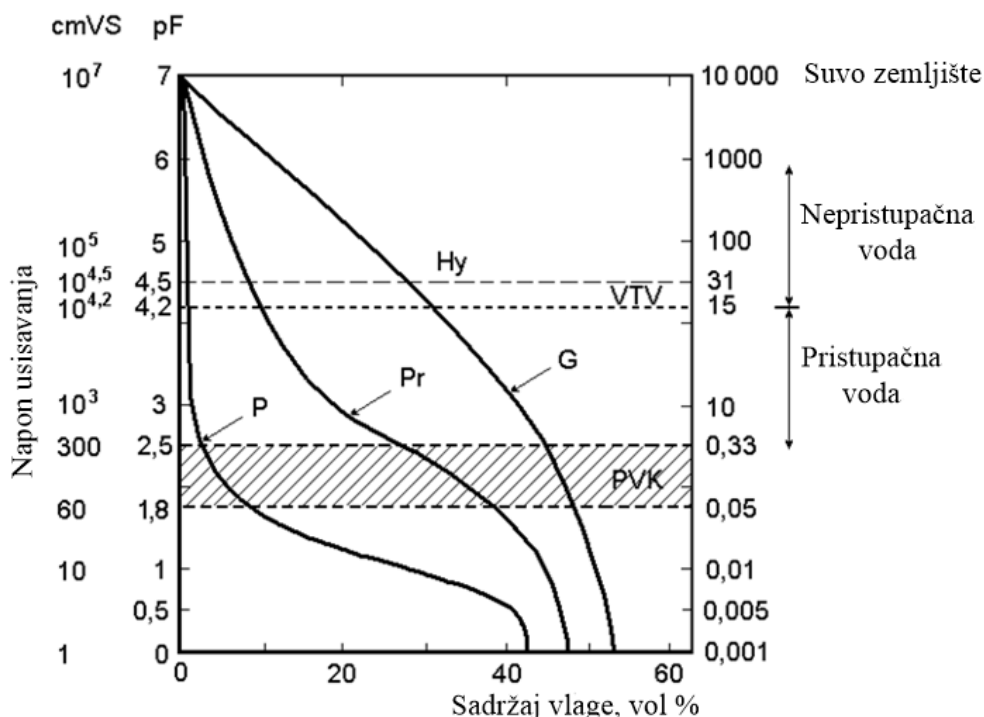
Slika 2.8 Gipsani senzor

Za razliku od zapreminskog procenta vlažnosti, vodni potencijal ne zavisi od tipa zemljišta. Ova osobina predstavlja veliku prednost kod mjerenja količine vlage u zemljištu. Dakle, kako se navedena dva metoda mjerenja vlažnosti razlikuju u tom smislu, veza između

njih se laboratorijski izračunava. Za konkretan uzorak zemljišta moraju se koristiti odgovarajući uređaji za generisanje krive koja daje odnos vodnog potencijala u odnosu na procentualni sadržaj vlage u zemljištu. Kriva zavisnosti vodnog potencijala tla od procentualne količine vode za tri vrste mineralnih zemljišta prikazana je na slici 2.9. Vodni potencijal se takođe može predstaviti i kao napon usisavanja (sukcije), čija je zavisnost u odnosu na količinu vode u procentima predstavljena krivom zadržavanja vlage u zemljištu (pF kriva). Odnos sile sukcije i sadržaja vlage u zemljištu dat je na slici 2.10. Na grafiku sa iste slike se mogu vidjeti i pF vrijednosti, krive zadržavanja vlage u zemljištu, koje takođe mogu predstavljati informaciju o količini vlage u zemljištu. Ove vrijednosti se mogu izraziti preko različitih veličina, u skladu sa pF krivom. Neke karakteristične vrijednosti prikazane su u tabeli 2.1.



Slika 2.9 Kriva vlažnosti (potencijala) tri reprezentativna mineralna zemljišta [7]



Slika 2.10 Odnos između napona usisavanja i sadržaja vlage (pF-krive) kod: P – pijeska, Pr – praha, G – gline, gdje je: VTV – vlažnost trajnog venuća, PVK – poljski vodni kapacitet, VS – vodeni stub [7]

Tabela 2.1 Odnosi pF vrijednosti (kriva zadržavanja vlage u zemljištu) prema pritisku (bar, MPa) i visini vodenog stuba (cm) [7]

pF	Bari (bar)	Megapaskala (MPa)	Visina vodenog stuba (cm)	Oznaka vodne konstante
1	0.01	0.001	10	
2	0.1	0.01	100	
2.5	0.33	0.03	330	PVK
3	1	0.1	1,000	UPV
4	10	1	10,000	
4.2	15	1.5	15,000	VTV
4.5	31	3.1	31,000	Hy
7	10,000	1,000	10,000,000	Suvo zemljište

Sa grafika na prethodnim slikama možemo utvrditi ukupnu pristupačnu vodu (UPV), za karakteristične tipove zemljišta, u čijim granicama je potrebno obezbijediti da se kreće vlažnost zemljišta. Takođe, iz tabele 2.1 možemo zaključiti u kojim granicama treba da se kreće vlažnost zemljišta, izražena različitim fizičkim veličinama.

Kako se jasno vidi na grafiku sa slike 2.10, mjerenje potencijala vlažnosti zemljišta, tj. napona usisavanja, ne zavisi od tipa zemljišta. Iz tog razloga je u praktičnoj realizaciji sistema za pametno navodnjavanje, čiji je razvoj prikazan u ovom radu, korišćen metod određivanja potencijala vlažnosti zemljišta za utvrđivanje količine vode koja se u zemljištu nalazi.

2.4 Izračunavanje norme navodnjavanja

Količina vode koja treba da bude primijenjena na nekoj proizvodnoj parceli izračunava se od strane stručnjaka iz oblasti melioracija, zavisno od karakteristika zemljišta i vrste biljke koja se na datoj parceli uzgaja. Izračunavanje optimalne količine vode potrebno je izvršiti prije instalacije sistema za pametno navodnjavanje, jer je ona jedinstvena za svaku proizvodnu parcelu. Norma navodnjavanja je količina vode koju treba dovesti na parcelu da bi se popunio ukupan deficit vode tokom vegetacionog perioda neophodan za normalan rast i razviće biljaka. Norma navodnjavanja se nikad ne dovodi na parcelu odjednom, već povremeno u manjim količinama. Količina vode koja se dovodi na parcelu u jednom navratu naziva se norma zalivanja [18]. Izračunavanje norme zalivanja u velikoj mjeri zavisi od zemljišta i njegovih karakteristika, kao i od dubine korjenovog sistema biljke koja se uzgaja na datoj parceli.

Kako bi se pravilno izračunala norma zalivanja potrebno je:

- uzeti uzorak zemljišta i uraditi mehaničku analizu;
- odrediti vodne osobine zemljišta.

Na osnovu mehaničke analize zemljišta mogu se posredno odrediti sljedeći parametri tzv. hidrološke (vodne) konstante: *PVK* (poljski vodni kapacitet), *VTV* (vlažnost trajnog venuća), saturacija, *UPV* (ukupna pristupačna voda) i *LPV* (lako pristupačna voda) (detaljnije u poglavlju 2.2). Osim navedenih parametara određuje se i maksimalan dozvoljeni utrošak vode (eng. *Deplition*). Ovaj parametar predstavlja limit ispod kojeg ne bi smio da padne sadržaj vlage u zemljištu, da bi biljka imala optimalnu snabdjevenost vodom.

Prvi korak kod izračunavanja norme navodnjavanja jeste uzimanje uzoraka zemljišta na nekim karakterističnim vrijednostima tenzije, koja se mjeri odgovarajućim senzorom (na primjer: 33KPa, 80KPa, 160KPa i 200KPa). Laboratorijskim metodama određuje se težina sadržaja vlage u uzorku (T_c). Takođe se, korišćenjem Kopecký cilindra [19], određuje zapreminska gustina uzorka zemljišta ($\rho = M_s / V_t$). Nakon toga, izračunava se zapreminski sadržaj vlage u zemljištu množenjem težine sadržaja vlage i gustine uzorka zemljišta ($W_{m\%} = T_c * \rho$).

Izračunavanje ukupne pristupačne vode (*UPV*) vrši se sljedećom formulom:

$$UPV = PVK - VTV$$

Maksimalan dozvoljeni utrošak vode izračunava se korišćenjem sljedeće jednačine:

$$Deplition = \eta * UPV$$

ili:

$$UPV = Deplition + LPV$$

gdje koeficijent η za različite vrste usjeva može imati vrijednost od 0.3 do 0.6. Konačno, količina vode za navodnjavanje, odnosno norma navodnjavanja, izračunava se kao:

$$W = 100 * d * \rho * (PVK - LPV) \left(\frac{m^3}{ha} \right)$$

gdje d označava dubinu korjenovog sistema biljke.

Izračunavanje norme navodnjavanja jedan je od najbitnijih segmenata za pravilno funkcionisanje sistema za pametno navodnjavanje. Ona predstavlja jedan od ulaznih parametara algoritma za određivanje optimalnih perioda navodnjavanja na proizvodnoj parceli, nastalog kao rezultat multidisciplinarnog istraživanja.

3 Hardverska osnova sistema za pametno navodnjavanje

Za uspješno funkcionisanje planiranog sistema potrebno je obraditi izvjesnu količinu ulaznih podataka različitog tipa, kao što su: temperatura i vlažnost zemljišta, temperatura i vlažnost vazduha, i slično. Ovi podaci, zajedno sa informacijama o optimalnoj količini vode za datu parcelu koja se navodnjava i sa gornjom granicom vlažnosti odnosno suvoće zemljišta, predstavljaju ulazne parametre algoritma za pametno navodnjavanje, pomoću koga treba odrediti trenutak uključenja i isključenja sistema ventila pomoću kojih se vrši navodnjavanje zemljišta. Uz algoritam za pametno navodnjavanje, bilo je potrebno realizovati mogućnost automatizovane kontrole procesa navodnjavanja po instrukcijama korisnika, ukoliko isti želi da ima potpunu kontrolu rada nad sistemom. Da bi se omogućila oba režima rada, bilo je potrebno napisati obiman program koji zahtijeva veliku moć procesiranja. Iz tog razloga, bilo je neophodno koristiti mikroprocesorsku platformu kao centralni dio sistema za pametno navodnjavanje, koja sa dodatnim komponentama (LCD ekran, tasteri za upravljanje i konfigurisanje sistema, kolo za aktivaciju/deaktivaciju ventila) čini glavnu kontrolnu jedinicu sistema.

Za pravilno funkcionisanje predloženog sistema za pametno navodnjavanje, bilo je potrebno omogućiti akviziciju potrebnih parametara sredine. Korišćenjem prikupljenih parametara, algoritam za pametno navodnjavanje upravlja autonomnim režimom rada sistema. Izabrano je da se za prikupljanje podataka o vlažnosti zemljišta i temperaturi vazduha koristi bežična senzorska mreža (u nastavku „WSN“). WSN (eng. *Wireless Sensor Network*) predstavlja mrežu senzora ili senzorskih čvorova sa baterijskim ili solarnim napajanjem, povezanih bežičnim putem. Njihov raspored tipično zavisi od njihove namjene. Broj čvorova zavisi od površine i konfiguracije zemljišta koje se navodnjava, kao i od željene preciznosti. Prednosti kod korišćenja WSN ogledaju se u njenoj autonomiji, gdje je zadatak senzorskih čvorova da efikasno, uz minimalnu potrošnju električne energije obrade podatak sa senzora i pošalju ga do glavne kontrolne jedinice ili susjednog čvora. Takođe, bežična komunikacija i baterijsko napajanje obezbjeđuju odsustvo kablova koji su nepraktični kod instalacije u obradivim zemljištima. U pilot realizaciji je izabrano da senzorski čvor bude opremljen senzorom za mjerenje vlažnosti zemljišta i temperature vazduha, kao i komunikacionim modulom. Senzorski čvorovi vrše obradu podataka sa senzora i izmjerene vrijednosti prenose ka glavnoj kontrolnoj jedinici. Na osnovu dobijenih podataka, koristeći algoritam za pametno navodnjavanje, kontroler određuje trenutke uključivanja i isključivanja elektromagnetnih ventila kojima se reguliše protok vode.

Kako bi se obezbijedilo praćenje rada sistema i čuvanje potrebnih podataka na osnovu kojih se može vršiti unapređenje sistema, a ujedno i omogućilo upravljanje pojedinim elementima sistema, bilo je potrebno arhivirati određene podatke slanjem na neki udaljeni server. Dakle, uspostavljanje Internet konekcije na glavnoj kontrolnoj jedinici bilo je od velike

važnosti. Za potrebe smještanja, vizuelizacije i obrade podataka od važnosti, koji se šalju, odabrana je *Internet of Things* platforma *Livegate* [20]. Pored toga, jedan od važnih segmenata predloženog sistema za pametno navodnjavanje jeste i mogućnost udaljenog konfigurisanja putem SMS komandi, razvijenih specijalno u ovu svrhu. Povezivanje sistema i slanje podataka na *Livegate* platformu, kao i njegovo udaljeno konfigurisanje vrši se posredstvom odgovarajućeg GSM/GPRS modula, integrisanog na glavnoj kontrolnoj jedinici.

U daljem tekstu, vezano za hardversku osnovu sistema za pametno navodnjavanje, biće date osnovne informacije o mikrokontrolerima i prikazane neke popularne mikrokontrolerske (mikroprocesorske) platforme. Zatim će detaljno biti opisana mikrokontrolerska platforma korišćena u razvoju predloženog sistema za pametno navodnjavanje. Dalje, u okviru ovog poglavlja biće data kratka teorijska osnova bežičnih senzorskih mreža, kao i opis funkcionalnosti korišćenog GSM/GPRS modula.

3.1 Mikrokontrolerska platforma

Razvoj *open source* hardvera i softvera omogućio je pojavu mikrokontrolerskih platformi pristupačne cijene, koje se lako koriste. Mikrokontrolerske *open source* platforme dobijaju sve češću primjenu kod rješavanja različitih zadataka iz svakodnevnog života, akvizicije parametara „spoljnog svijeta“ pomoću senzora i donošenja adekvatnih odluka na osnovu dobijenih informacija. Uglavnom su u pitanju *low-cost* platforme, koje se mogu koristiti u različite namjene, od edukacije do razvoja komercijalnih rješenja. Kako u realizaciji sistema za pametno navodnjavanje, centralni dio zauzima mikrokontrolerska platforma bazirana na *open source* rješenjima, u nastavku će posebna pažnja biti posvećena opisu funkcionalnosti mikrokontrolera i mikrokontrolerskih platformi.

3.1.1 Osnovno o mikrokontrolerima

Mikrokontroler predstavlja integrisano kolo koje se sastoji od jednog ili više procesorskih jezgara, zajedno sa memorijom i programabilnim ulazno/izlaznim periferijama. Glavna primjena mikrokontrolera jeste u sistemima i uređajima tzv. ugrađene kontrole (eng. *Embedded-Control Systems*). Ovi sistemi služe da reaguju na spoljašnje, asinhrono događaje u realnom vremenu, a ne samo da obrađuju ulazne podatke, na osnovu kojih nakon nekog vremena daju izlazni podatak, kao u klasičnoj obradi podataka [21].

Mikrokontroleri su obično malih dimenzija i pristupačne cijene. Proizvode se u milijardama komada godišnje [22], a integrisani su u mnogim uređajima na čiju smo upotrebu svakodnevno navikli, poput:

- telekomunikacionih uređaja (mobilni telefoni, pametni telefoni, tableti, ...),
- kućanskih aparata (mikrotalasna pećnica, mašina za pranje veša, mašina za pranje suđa, šporet, aparat za kafu, ...),
- automobila (kontrola rada motora, kontrola kočenja, sistem protiv proklizavanja, klimatizacija, navigacija,...),
- itd.

Kako bi se vršila obrada podataka i inteligentno donošenje odluka na osnovu njih, potrebno je preuzimati potrebne informacije iz fizičkog svijeta. U tu svrhu, mikrokontroleri imaju veći broj ulazno izlaznih interfejsa za prikupljanje podataka. Putem ovih interfejsa podaci se prosleđuju procesoru, koji, nakon obrade podataka, vrši preduzimanje određenih akcija. Mikrokontroleri imaju nekoliko obaveznih komponenti, a to su:

- Centralna procesorska jedinica (CPU), koja vrši obradu podataka na osnovu programskih instrukcija koje se nalaze u memoriji.
- Radna memorija (RAM – *random access memory*), u kojoj se nalaze podaci sa kojima trenutno radi CPU, kao i rezultati njenog rada.
- Programska memorija koja služi za smještanje programa koji mikrokontroler izvršava, a koja se implementira u obliku ROM, EPROM ili (u novije vrijeme) *flash* memorije.
- Ulazno izlazni (I/O) interfejsi koji omogućavaju komunikaciju sa perifernim uređajima kao što su: I/O uređaji (tastatura, miš, displej, ...), senzori, aktuatori, komunikacioni uređaji, uređaji za akviziciju podataka i slično.

Ne tako rijetko se dešava da se pojmovi mikrokontroler i mikroprocesor poistovjećuju. Međutim, postoji velika razlika između ova dva pojma i ne bi ih trebalo ni u kom slučaju poistovjećivati. Na primjer, ukoliko je potrebno realizovati sistem za upravljanje nekim uređajem, a na osnovu periodičnog očitavanja informacija sa odgovarajućih senzora, to je moguće uraditi korišćenjem nekog mikroprocesora (na primjer Z-80¹). Međutim, u tom slučaju su potrebni dodatni sklopovi. Neophodno je povezati mikroprocesor sa RAM memorijom u kojoj bi se čuvale vrijednosti promjenljivih, kao i sa memorijom za smještanje programa koji se izvršava (ROM, EPROM ili *flash*). Osim toga, moguća je potreba za prenosom podataka između mikroprocesora i ulazno/izlaznih uređaja, za serijskom komunikacijom sa nekim računarom, za rad sa informacijama o vremenu (tajmer), za čuvanjem određenih parametara za slučaj nestanka napajanja (EEPROM) i slično. U svim navedenim slučajevima neophodno je koristiti dodatne sklopove u diskretnoj tehnologiji ili u obliku integrisanih kola. Ukoliko je potrebno koristiti analogne senzore, potrebno je dodati i A/D konvertor(e). Dakle, potrebno je dizajnirati PCB² ploču koja ima veliki broj komponenti. Realizacija ovakvog uređaja se može značajno optimizovati korišćenjem mikrokontrolera (na primjer ATmega16³). Korišćenjem

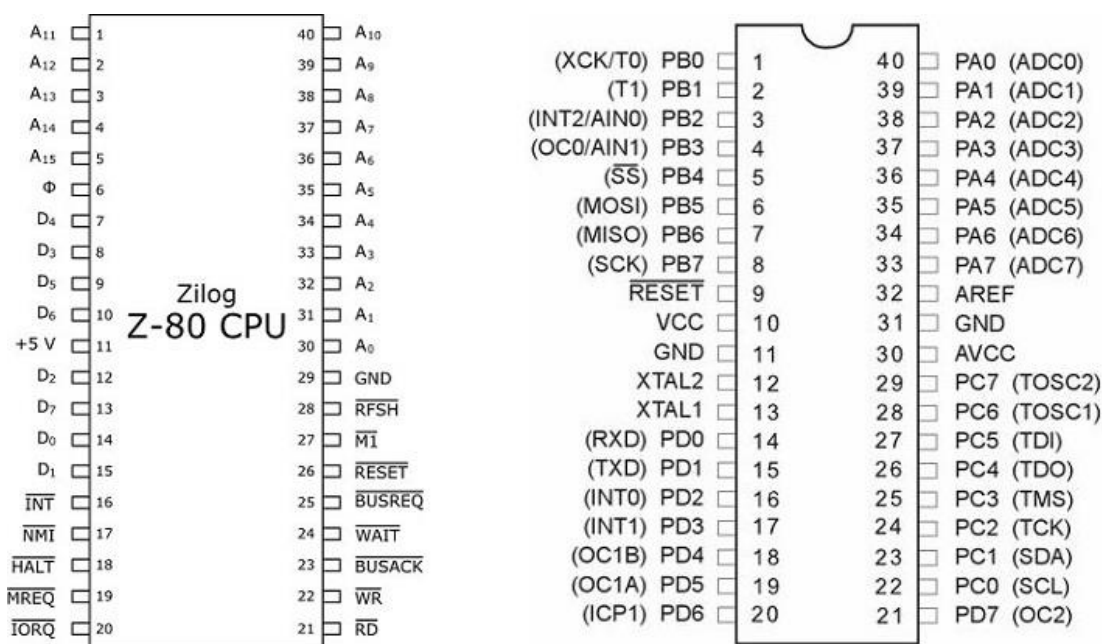
¹ Z-80 je 8-bitni mikroprocesor proizveden 1976. godine od strane kompanije Zilog

² PCB (eng. *Printed Circuit Board*) predstavlja štampanu ploču na kojoj se povezuju elektronske komponente

³ ATmega16 je 8-bitni AVR mikrokontroler proizveden od strane kompanije Atmel

mikrokontrolera štedimo resurse i smanjujemo veličinu same PCB ploče. Ovo je moguće jer mikrokontroler ATmega16 u sebi sadrži sve gore navedene komponente kao i sopstveni procesor.

Razlika između mikroprocesora i mikrokontrolera se može uočiti i posmatrajući raspored njihovih pinova, kao što je prikazano na slici 3.1.



Slika 3.1 Raspored pinova mikroprocesora Z-80 (lijevo) i mikrokontrolera ATmega16 (desno) [22]

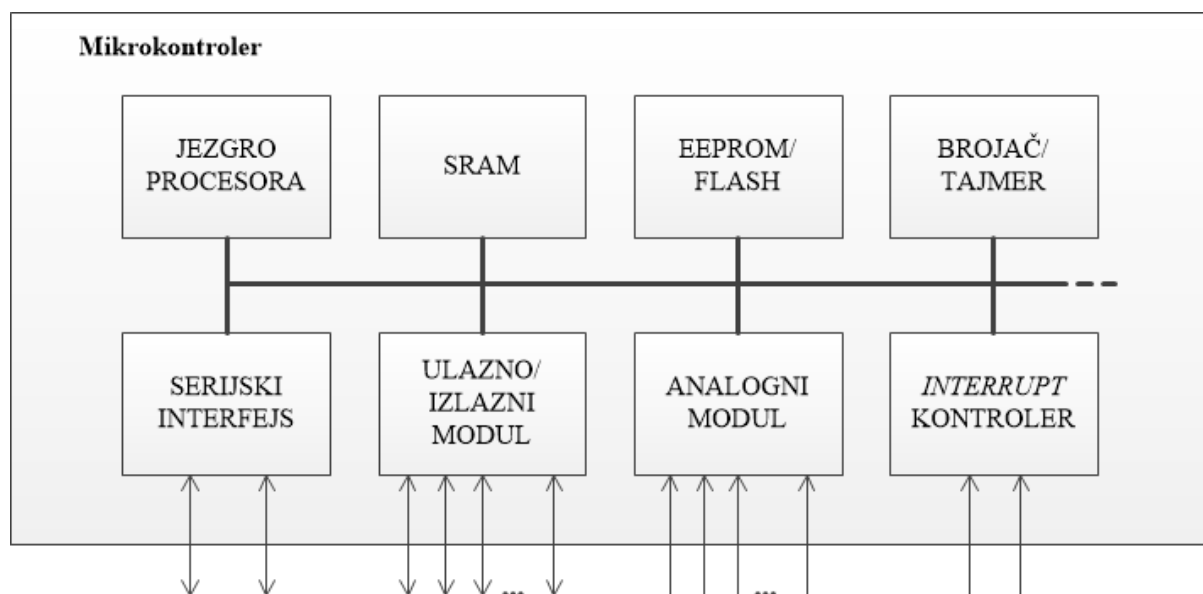
Z-80 ima tipičan raspored pinova jednog mikroprocesora, sa adresnim i *data* pinovima, kao i nekim kontrolnim pinovima. Nasuprot ovom mikroprocesoru, ATmega16 nema adresne i *data* pinove već ima 32 ulazno/izlazna pina opšte namjene, koji se mogu koristiti u različite svrhe. Osim napajanja, jedini rezervisani pinovi na ATmega16 su pin za resetovanje (RESET), pinovi za povezivanje kristal-a/oscilator-a (XTAL1 i XTAL2) i pin za referentni analogni napon AREF.

Mikrokontroleri se međusobno razlikuju po arhitekturi, odnosno po tome kojoj porodici mikrokontrolera pripadaju. Mikrokontroleri koji pripadaju jednoj porodici sadrže isto jezgro procesora i stoga su kompatibilni, ali se razlikuju u dodatim komponentama, kao što su broj tajmera ili količina memorije. Postoje različite porodice mikrokontrolera, kao što su: 8051, PIC, HC, ARM, itd. Kod svih ovih porodica imamo veliki izbor različitih mikrokontrolera. Za ilustraciju, u tabeli 3.1 su prikazani neki mikrokontroleri iz AVR porodice. Ono što je zajedničko za sve mikrokontrolere prikazane u tabeli jeste AVR procesorsko jezgro, koje sadrži 32 registra opšte namjene i izvršava većinu zadatih instrukcija unutar jednog taktnog ciklusa.

Tabela 3.1 Poređenje 8-bitnih AVR mikrokontrolera

Kontroler	Flash (KB)	SRAM (B)	EEPROM (B)	I/O Pinovi	A/D (Kanali)	Interfejsi	
AT90C8534	8	288	512	7	8	UART,SPI	
AT90LS2323	2	128	128	3			
AT90LS2343	2	160	128	5			
AT90LS8535	8	512	512	32	8		
AT90S1200	1	64		15			
AT90S2313	2	160	128	15			
ATmega128	128	4096	4096	53	8	JTAG, SPI, I2C	
ATmega162	16	1024	512	35		JTAG, SPI	
ATmega169	16	1024	512	53	8	JTAG, SPI, I2C	
ATmega16	16	1024	512	32	8	JTAG, SPI, I2C	
ATtiny11	1		64	5+1 In	4	SPI	
ATtiny12	1		64	6			
ATtiny15L	1		64	6			
ATtiny26	2		128	128			16
ATtiny28L	2		128				11+8 In

Osnovni unutrašnji dizajn svakog mikrokontrolera je sličan. Sve komponente su povezane internom magistralom i sve su integrisane na istom čipu. Moduli su povezani sa spoljnom okolinom preko ulazno/izlaznih pinova. Na slici 3.2 prikazan je blok dijagram tipičnog dizajna mikrokontrolera.



Slika 3.2 Blok dijagram dizajna mikrokontrolera

Jezgro procesora je glavna komponenta svakog mikrokontrolera. Sadrži aritmetičko-logičku jedinicu, kontrolnu jedinicu i registre (pokazivač na *stack*, programski brojač, fajl registar, registre opšte namjene, ...).

Memorija je ponekad podijeljena na programsku memoriju i memoriju koja služi za smještanje podataka. U većim mikrokontrolerima, DMA (eng. *Direct Memory Access*) kontroler upravlja prenosom podataka između perifernih komponenti i memorije.

Interrupt kontroler ima ulogu prekidanja normalnog toka glavnog programa. Ovo se dešava u slučaju važnog, predefinisano, internog ili eksternog događaja. Kada se desi *interrupt*, program prekida izvršavanje sve dok se određeni zadaci, definisani *interrupt* rutinom, ne izvrše. Kada se rutina završi, izvršavanje glavnog programa se nastavlja na mjestu gdje prethodno prekinut.

Većina mikrokontrolera imaju makar jedan, a najčešće više brojača/tajmera koji se mogu koristiti za vremensko označavanje događaja, mjerenje intervala ili brojanje događaja. Mnogi mikrokontroleri takođe sadrže PWM (eng. *Pulse Width Modulation*) izlaze, koji se, na primjer, mogu koristiti za upravljanje motorima ili za kontrolisanje kočionih sistema kod automobila (sistem protiv proklizavanja, ABS). Osim toga, PWM izlaz se može iskoristiti, u kombinaciji s filterom na svom izlazu, za realizaciju jeftinog digitalno/analognog konvertora.

Paralelni digitalni ulazno/izlazni (I/O) portovi su jedna od glavnih odlika mikrokontrolera. Broj I/O pinova varira od 3-4 pa i do preko 90, u zavisnosti od porodice i tipa mikrokontrolera.

Osim nekoliko malih mikrokontrolera, većina imaju integrisane analogno/digitalne konvertore, koji se razlikuju u broju kanala (najčešće 2-16) i njihovoj rezoluciji (najčešće 8-12 bitova). Analogni modul obično ima i analogni komparator. U nekim slučajevima, mikrokontroler uključuje i digitalno/analogni konvertor.

Mikrokontroleri uglavnom imaju barem jedan serijski interfejs koji se može koristiti za preuzimanje programa i za komunikaciju sa razvojnim okruženjem na računaru. Kako se serijski interfejs može koristiti i za komunikaciju sa perifernim uređajima, većina mikrokontrolera nudi nekoliko različitih komunikacionih interfejsa kao što su UART (eng. *Universal Asynchronous Receiver/Transmitter*), SPI (eng. *Serial Peripheral Interface*) i SCI (eng. *Serial Communication Interface*). Mnogi mikrokontroleri sadrže integrisane kontrolere za kontrolu komunikacije putem magistrale za prenos podataka. I²C (eng. *Inter-Integrated Circuit*) i CAN (eng. *Controller Area Network*) kontroleri su najzastupljeniji. Veći mikrokontroleri mogu sadržati i PCI, USB ili *Ethernet* interfejse.

Budući da je ispravno i pouzdano funkcionisanje sistema baziranih na mikrokontrolerima imperativ, neophodno je koristiti mjere zaštite od mogućih grešaka u izvršavanju programa i/ili mogućih smetnji u hardveru. Zato se često koristi tzv. *Watchdog*

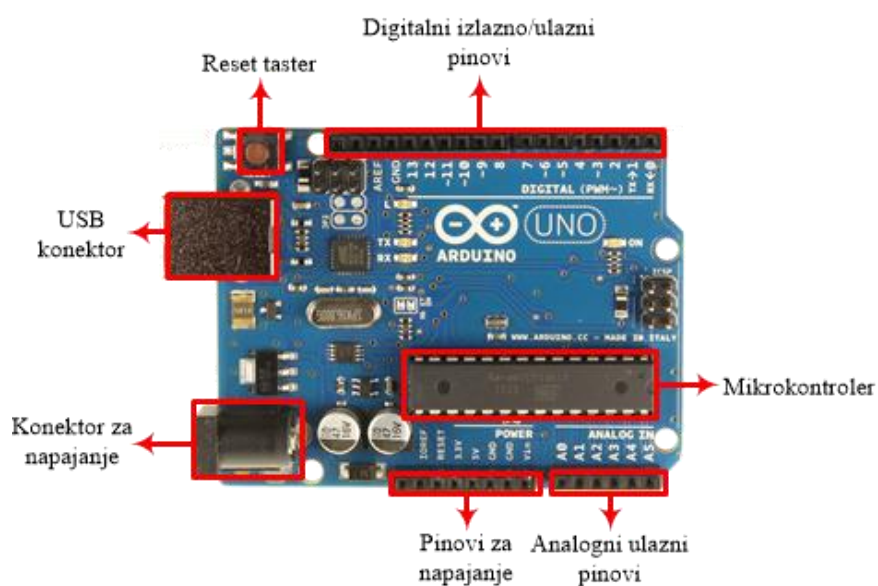
tajmer, čiji zadatak je da resetuje mikrokontroler u slučaju da program prestane da se regularno izvršava.

3.1.2 Pregled nekih popularnih mikrokontrolerskih *open source* platformi

Mikrokontrolerske *open source* razvojne platforme omogućavaju korisnicima da, uz pouzdanost, efikasnost, fleksibilnost i pristupačnu cijenu, razvijaju različite uređaje i interaktivne sisteme. Ovi sistemi, odnosno uređaji, mogu biti opremljeni različitim senzorima za prikupljanje podataka iz fizičkog svijeta, a isto tako mogu posjedovati aktuatora za kontrolisanje drugih uređaja i sistema. Izraz *open source* odnosi se i na hardver i na softver, što znači da je moguće slobodno koristiti i dalje razvijati već dostupna hardverska i softverska rješenja i alate. Programeri mogu praviti izmjene na softverskim alatima koji služe za kompajliranje i *upload* koda u mikrokontrolerske platforme. Takođe, mogu modifikovati postojeće i razvijati svoje biblioteke za lakše korišćenje platforme u budućnosti. *Open source* hardver omogućava korisnicima da prilagođavaju postojeće mikrokontrolerske platforme svojim potrebama, dodajući potrebne komponente. Na taj način, korisnici mogu da poprave postojeći dizajn prema potrebama svoje aplikacije.

Na tržištu postoji mnoštvo različitih *open source* mikrokontrolerskih razvojnih platformi. Neke od najčešće korišćenih razvojnih platformi dostupnih na tržištu su: Arduino, Raspberry Pi, BeagleBone, Libelium Waspote, itd. Svi proizvođači ovih platformi trude se da razviju fleksibilne uređaje koji se lako koriste, po pristupačnoj cijeni. U narednom dijelu ovog poglavlja biće date osnovne karakteristike pomenutih razvojnih platformi.

Arduino [23] je *open-source* kompanija, projekat, i zajednica korisnika koja dizajnira i proizvodi mikrokontrolerske platforme za razvoj digitalnih uređaja i interaktivnih objekata. Arduino razvojne ploče posjeduju veliki broj ulazno/izlaznih pinova, koji služe za povezivanje senzora, aktuatora, različitih modula (eng. *shield*), i drugih elektronskih kola. Broj pinova zavisi od modela ploče, odnosno od ugrađenog mikrokontrolera. Zahvaljujući svojoj jednostavnosti i pouzdanosti, Arduino se koristi u velikom broju različitih projekata i aplikacija i danas predstavlja najpopularniju mikrokontrolersku razvojnu platformu. Postoje različiti modeli Arduino platformi, koje se razlikuju po modelu mikrokontrolera, veličini, broju ulazno izlaznih pinova, itd. Neke od najčešće korišćenih verzija Arduino platforme su: Arduino Uno (slika 3.3), Arduino Mega, Arduino Due i Arduino Nano. Sve verzije ove mikrokontrolerske platforme koriste Atmel 8-, 16- ili 32-bitne AVR mikrokontrolere (ATmega8, ATmega168, ATmega328, ATmega1280, ATmega2560). Većina platformi koristi logičke nivoe od 5V i rade na frekvenciji od 16MHz. Kao softversko razvojno okruženje za programiranje koristi se Arduino IDE okruženje. Arduino programski jezik je baziran na standardnim C/C++ programskim jezicima i koristi C/C++ kompajler (avr-g++). Dakle, moguće je koristiti standardne C i C++ biblioteke i funkcije kod pisanja programa za mikrokontrolersku platformu, uz dodatne ugrađene Arduino funkcije (npr. `digitalWrite()` i `Serial.print()`) [24].



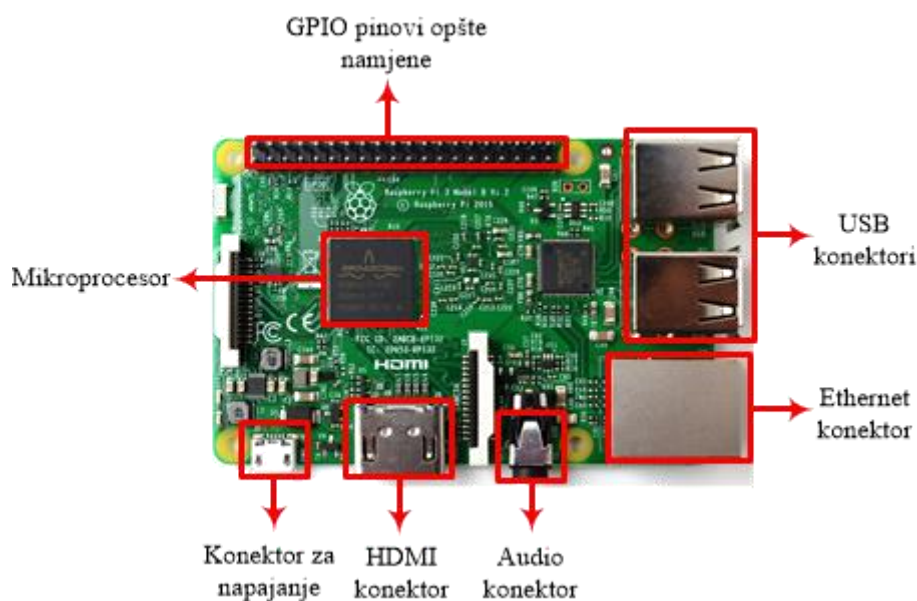
Slika 3.3 Arduino Uno

Raspberry Pi [25] predstavlja *single-board* računar veličine kreditne kartice. Proizveden je u Engleskoj od strane Raspberry Pi fondacije. Prvobitna namjena je bila podsticanje učenika i studenata za učenje osnova računarstva u školama i na fakultetima. Danas Raspberry Pi ima mnogo širu primjenu, od obrazovnog karaktera do razvijanja složenih sistema i uređaja različite namjene. Raspberry Pi hardver je evoluirao kroz nekoliko verzija, koje se razlikuju u kapacitetu memorije i podrške za periferne uređaje. Za ilustraciju, u tabeli 3.2 je dato poređenje Raspberry Pi modela A i B.

Tabela 3.2 Osnovne karakteristike Raspberry Pi modela A i B

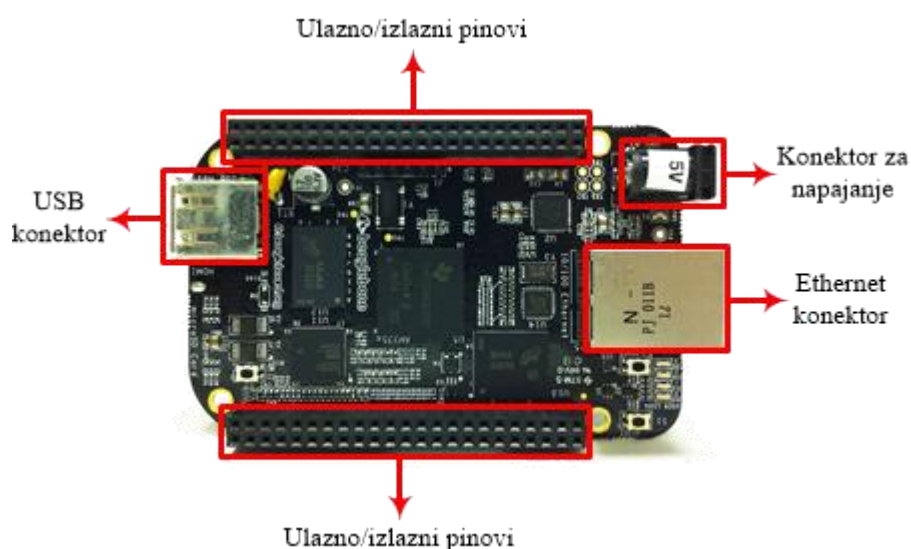
Model	Generacija	Arhitektura	CPU	SDRAM	Potrošnja
A	1	ARMv6Z (32-bit)	700 MHz single-core ARM1176JZF	256 MB	300mA (1.5W)
	1+	ARMv6Z (32-bit)	700 MHz single-core ARM1176JZF	512 MB	200mA (1W)
B	1	ARMv6Z (32-bit)	700 MHz single-core ARM1176JZF	512 MB	700mA (3.5W)
	1+	ARMv6Z (32-bit)	700 MHz single-core ARM1176JZF	512 MB	350mA (1.75W)
	2	ARMv7-A (32-bit)	900 MHz 32-bit quad- core ARM Cortex-A7	1 GB	820mA (4.1W)
	2 ver. 1.2	ARMv8-A (64/32-bit)	900 MHz 64-bit quad- core ARM Cortex-A53	1 GB	820mA (4.1W)
	3	ARMv8-A (64/32-bit)	1.2 GHz 64-bit quad- core ARM Cortex-A53	1 GB	1.34A (6.7W)

U ovom trenutku najnovija verzija je Raspberry Pi 3 Model B (slika 3.4). Ona predstavlja *state of the art* u pogledu *single-board* računara na tržištu. Kod razvoja različitih aplikacija najzastupljeniji programski jezik je Python, ali se takođe koriste C, C++, Java, itd. Raspberry Pi pruža mogućnost povezivanja perifernih komponenti i uređaja (senzori, aktuatori, itd.) putem GPIO pinova opšte namjene, a takođe se mogu povezati i ostali periferni uređaji kao što su tastatura ili miš, pomoću ugrađenih USB portova, monitor putem HDMI porta i displej putem video kontrolera. Umrežavanje uređaja se vrši putem *Ethernet* porta koji je ugrađen u vidu USB *Ethernet* adaptera, dok najnoviji model, uz *Ethernet*, ima ugrađene WiFi i *Bluetooth* module.



Slika 3.4 Raspberry Pi 3 Model B

BeagleBone [26] uređaji su *single-board* računari malih dimenzija, bazirani na Texas Instruments procesorima male potrošnje, sa ARM (eng. *Advanced RISC Machine*) Cortex-A jezgrom. I pored navedenih karakteristika, imaju sve mogućnosti današnjih desktop računara. U početku, razvoj ovih platformi bio je usmjeren ka omogućavanju podrške Linux distribucija u poboljšanju ARM uređaja. Kasnije, zbog velikog uspjeha i podrške različitih Linux distribucija, BeagleBone se usmjerava ka razvoju jednostavnijeg korišćenja uređaja uz pomoć sofisticiranog GUI-a (eng. *Graphical User Interface*) i/ili uređaja sa omogućenim umrežavanjem uz vrlo poznata okruženja kao što su: Ubuntu, QNX, Windows Embedded, Android, pa čak i Arduinu slična programska okruženja. Procesor koji koriste BeagleBone uređaji je veoma pouzdan *low-cost* procesor opšte namjene. Ima mogućnosti 2D i 3D grafičkih ubrzanja, i optimizovan je za obradu multimedijalnih sadržaja. Postoje više modela BeagleBone uređaja, i to: BeagleBone Black (slika 3.5), BeagleBone (original), SeeedStudio BeagleBone Green, SanCloud BeagleBone Enhanced. BeagleBone uređaji se napajaju preko USB porta, koji se takođe koristi za razvoj i *upload* programa ka uređaju.



Slika 3.5 BeagleBone Black

Izbor i implementacija odgovarajuće mikroprocesorske platforme je od velikog značaja za efikasnu realizaciju sistema predloženog u ovom radu. Platforma mora da bude u stanju da u realnom vremenu izvrši obradu podataka, donese odluke i izvrši odgovarajuće akcije. Takođe, bilo je potrebno izvršiti integraciju platforme sa odgovarajućim komunikacionim modulom koji će prihvatati podatke sa senzorskih čvorova koji su instalirani na proizvodnoj parceli putem bežične senzorske mreže. Ujedno, od velike važnosti bila je mogućnost lakog uspostavljanja GSM/GPRS konekcije putem odgovarajućeg modula, radi udaljenog konfigurisanja sistema i arhiviranja važnih podataka. Dakle, u ovoj realizaciji bila je potrebna modularna, pouzdana mikroprocesorska platforma, koja ima kapacitet procesiranja velikog broja podataka sa mogućnošću nadogradnje brojnim komunikacionim modulima. Zbog svega navedenog, izabrano je da centralni dio sistema za pametno navodnjavanje bude razvijen na Libelium Wasp mote *open-source* mikrokontrolerskoj platformi, koja u potpunosti odgovara prethodno navedenim zahtjevima. U daljem tekstu biće dat detaljan opis i analiza Wasp mote mikrokontrolerske platforme, korišćene u ovoj implementaciji.

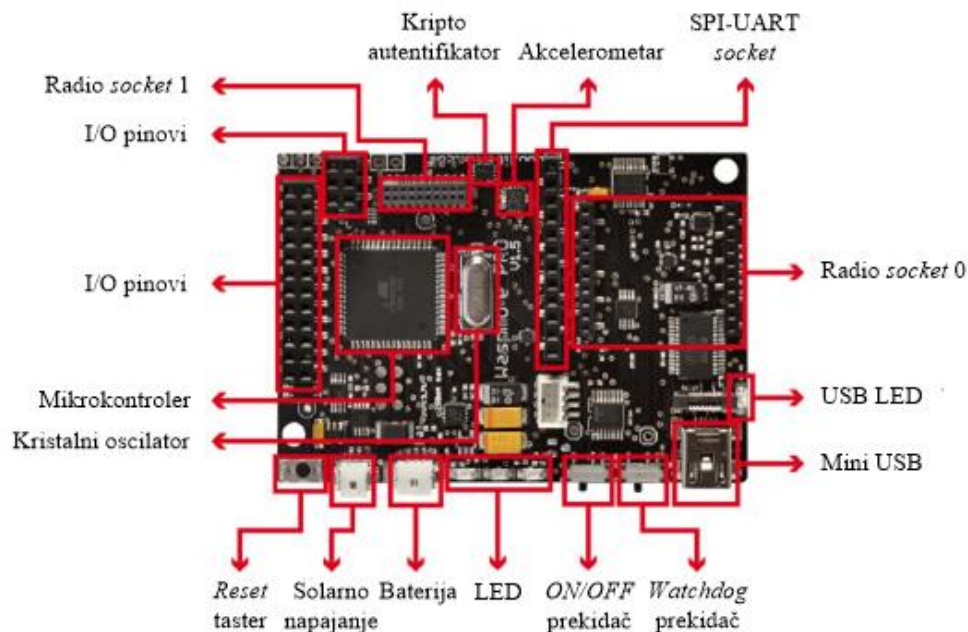
3.1.3 Libelium Wasp mote open source razvojna platforma

Sistem za pametno navodnjavanje je razvijen i implementiran koristeći Libelium Wasp mote *open source* mikrokontrolersku platformu. Ova platforma je po prvi put predstavljena u novembru 2009. godine od strane kompanije Libelium. Izuzetno je pogodna za korišćenje zbog veoma male potrošnje energije i zbog svojih *plug and play* mogućnosti. Kako bi mogla da se prilagodi potrebama različitih aplikacija, platforma podržava upotrebu različitih vidova komunikacije. Dakle, Wasp mote se može nadograditi brojnim modulima, uz korišćenje odgovarajućih softverskih biblioteka.

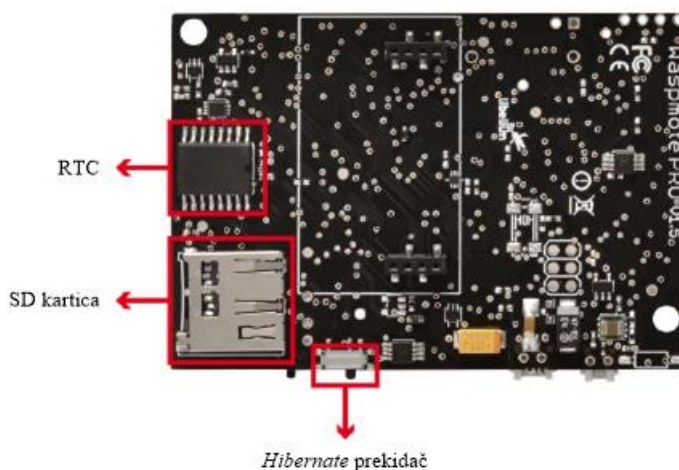
Waspote razvojna platforma bazira se na modularnoj arhitekturi. Takav pristup omogućava korišćenje samo modula koji su potrebni za realizaciju određene aplikacije. Oni se mogu proširivati i mijenjati u skladu sa potrebama. Postoje više vrsta modula koji se mogu integrisati sa Waspote platformom:

- GPRS modul (Quadband: 850/900/1800/1900 MHz)
- 3G modul (Dual-Band WCDMA/UMTS 900/2100 MHz i Tri-Band GSM/GPRS/EDGE 850/900/1800 MHz)
- 4G modul (verzije Evropa/Brazil, Amerika i Australija)
- WiFi modul
- *Bluetooth* moduli: *Bluetooth Low Energy* i *Bluetooth Pro*
- GPS modul
- ZigBee/802.15.4 moduli (2.4GHz, 868MHz, 900MHz)
- LoRaWAN modul (433/868/900 MHz)
- LoRa modul (868/900 MHz)
- Sigfox modul (868/900 MHz)
- NFC/RFID modul
- Moduli za integraciju senzora različitih namjena (*Smart Cities, Smart Water, Smart Agriculture, Smart Environment, Smart Parking, Smart Metering, Radiation, Gases, Events*)
- Modul za SD memorijsku karticu

Waspote platforma (slika 3.6 i slika 3.7) je bazirana na ATmega1281 mikrokontroleru koji radi na taktu od 14.7456 MHz. Posjeduje 8 KB SRAM i 4 KB EEPROM memorije, i ima ugrađen interni časovnik (RTC - eng. *Real Time Clock*). Takođe, sadrži internu FLASH memoriju od 128 KB sa mogućnošću proširivanja memorije SD karticom do 2 GB. Temperaturni opseg rada Waspote platforme je od -10°C do 65°C .

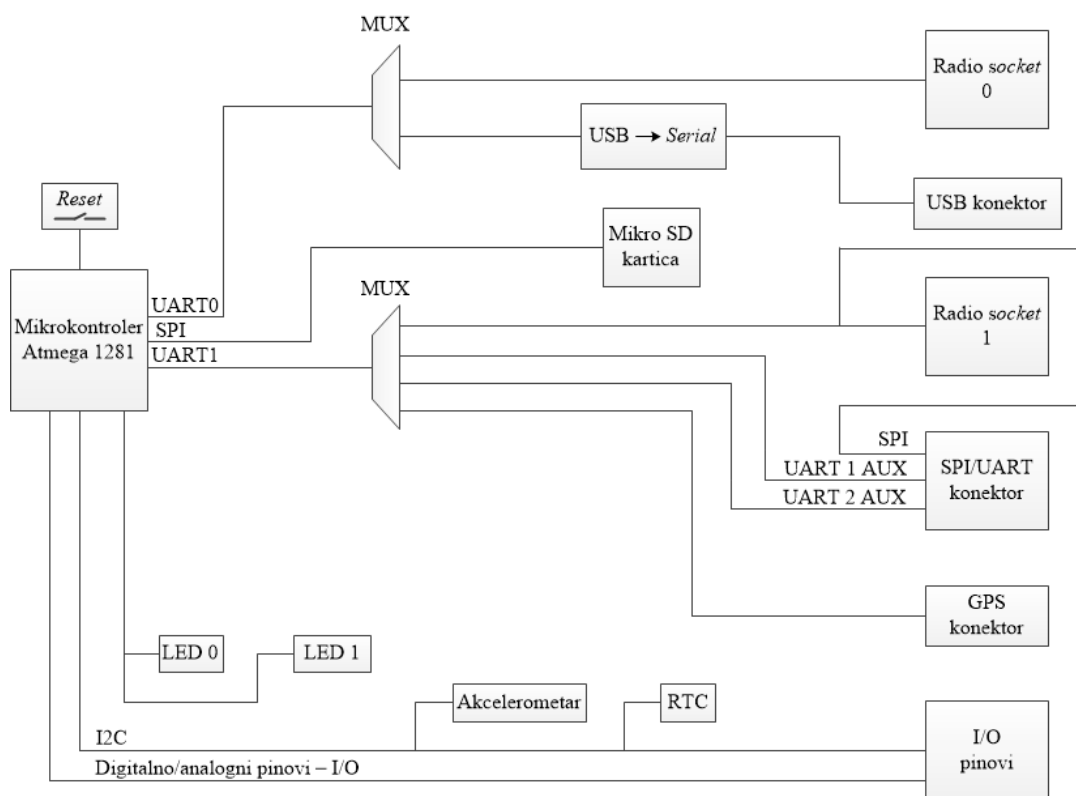


Slika 3.6 Waspote pogled odozgo

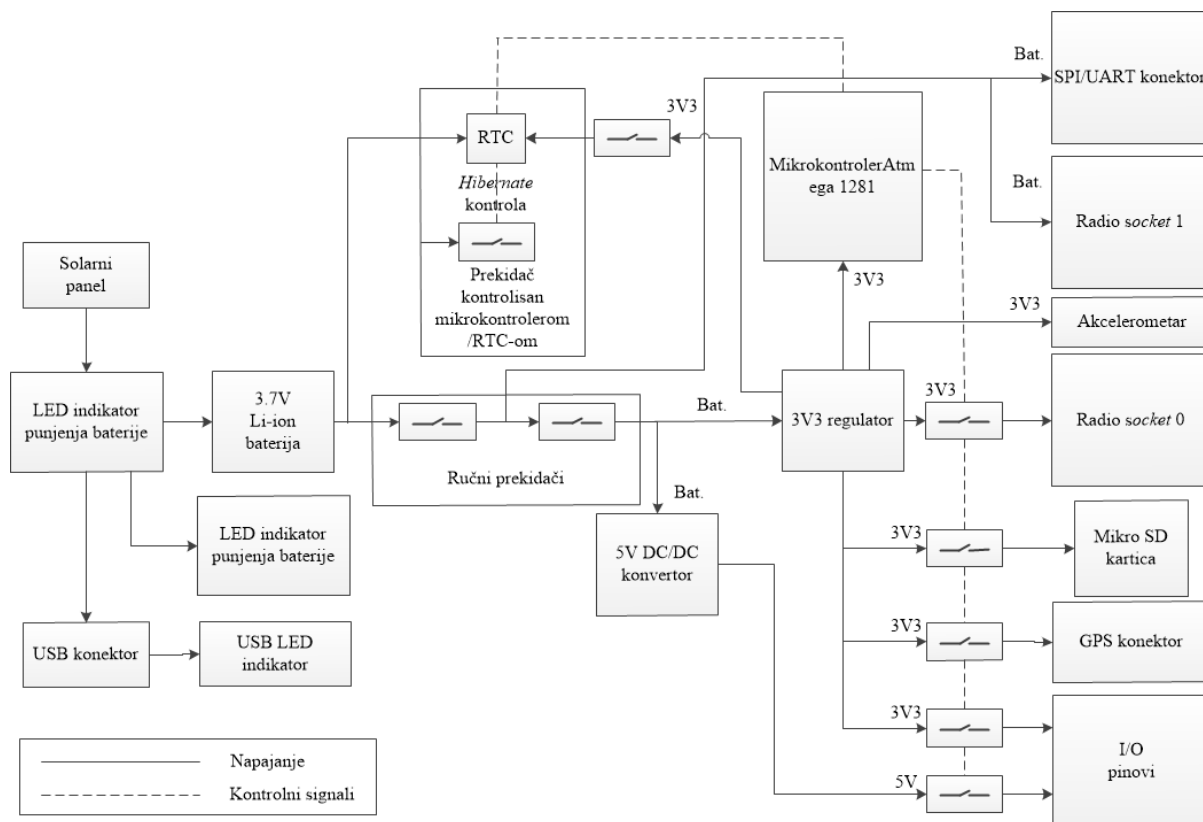


Slika 3.7 Waspote pogled odozdo

Da bi mogli da iskoristimo sve mogućnosti koje nudi Waspote platforma potrebno je poznavati način povezivanja njenih komponenti. Takođe, platforma je dizajnirana tako da potrošnja bude minimalna, pa većina komponenti ima nezavisno napajanje koje se vrši preko ugrađenih prekidača. Ovi prekidači se kontrolišu softverski tako da je moguće aktivirati samo one komponente koje su potrebne u datom trenutku. Iz tog razloga, poznavanje arhitekture platforme je od velikog značaja. Blok dijagrami *data* signala i signala za napajanje Waspote platforme prikazani su na slici 3.8 i slici 3.9, respektivno.



Slika 3.8 Blok dijagram data signala Wasmote platforme



Slika 3.9 Blok dijagram signala za napajanje Wasmote platforme

Waspote platforma se može napajati na dva načina:

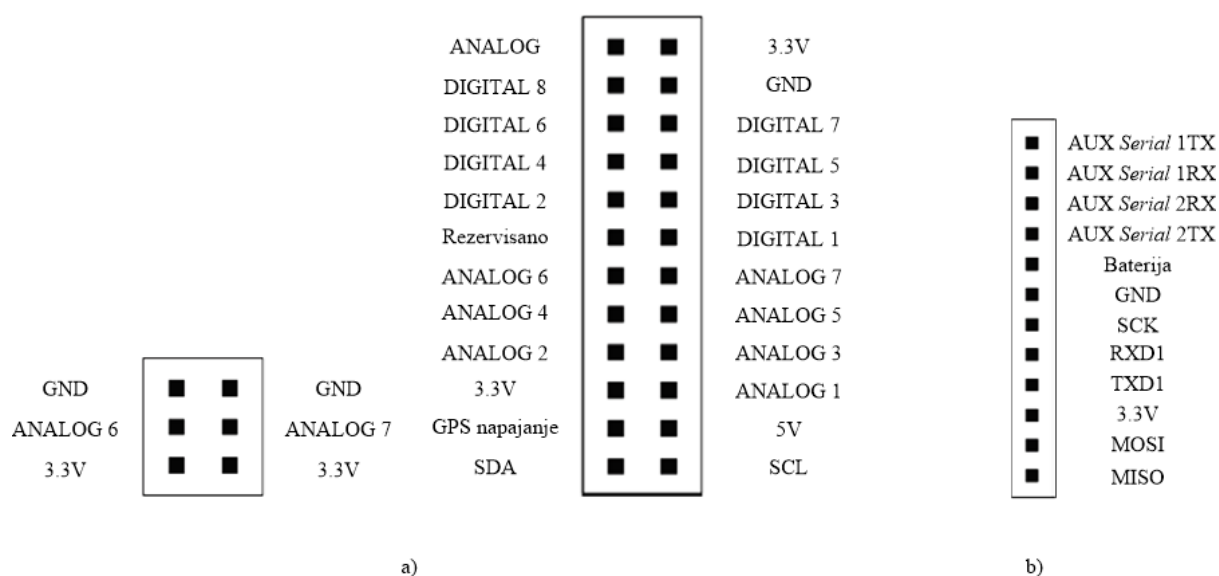
- preko USB konektora ili
- solarnim panelom.

Putem mini USB konektora obezbjeđuje se napon napajanja od 5V. Osim napajanja, omogućava se i komunikacija sa računarom kao i upisivanje programskog koda u Waspote platformu. Takođe, USB kablom se obezbjeđuje punjenje Li-ion baterije, ukoliko je priključena na platformu. Maksimalna struja punjenja baterije preko USB priključka iznosi 480mA.

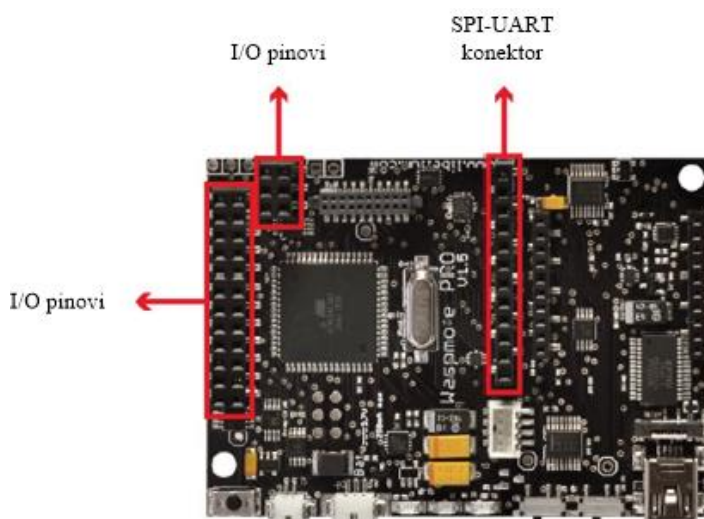
Solarno napajanje je od izuzetnog značaja u aplikacijama gdje nije moguće koristiti napajanje putem USB kabla, odnosno napajanje iz elektro-distributivne mreže. Napon solarnog panela za napajanje Waspote platforme može iznositi 6-12V. Prvenstvena uloga solarnog napajanja jeste punjenje Li-ion baterije, koja je u ovom slučaju praktično obavezni dio sistema. Struja punjenja baterije putem solarnog panela maksimalno iznosi 330mA.

Platforma koristi Li-ion bateriju, sa nominalnom vrijednošću napona od 3.7V i kapacitetom od 6600mAh. Minimalna vrijednost ovog napona može biti 3.3V, dok je maksimalna vrijednost 4.2V. Prilikom korišćenja komunikacionih modula u kombinaciji sa platformom, neophodno je koristiti bateriju bez obzira na to da li platformu napajamo putem USB kabla. Razlog korišćenja baterije je velika impulsna snaga koju je potrebno isporučiti za nesmetano funkcionisanje komunikacionih modula. Maksimalna struja potrebna za rad komunikacionih modula može kratkotrajno dostići i do 2A, i ne može se isporučiti samo preko USB kabla.

Za povezivanje sa drugim eksternim uređajima Waspote koristi ulazno/izlazne (I/O) portove kao i SPI-UART konektor (eng. *socket*). Raspored pinova I/O portova kao i pinova na SPI-UART konektoru prikazani su na slici 3.10, dok je njihova pozicija na Waspote platformi prikazana na slici 3.11.



Slika 3.10 a) I/O pinovi, b) SPI-UART konektor



Slika 3.11 Pozicija I/O pinova i SPI-UART konektora na Wasmote platformi

Wasmote platforma raspolaže sa osam digitalnih portova, koji se mogu koristiti kao ulazni ili kao izlazni portovi. Visok logički nivo (logička jedinica) ima vrijednost 3.3V, tj. vrijednost radnog napona platforme. Nizak logički nivo (logička nula) ima vrijednost napona od 0V. Konfigurisanje digitalnih portova vrši se programski. Ukoliko želimo da koristimo neki digitalni port kao ulazni i pročitamo njegovu vrijednost, upotrebićemo ugrađene funkcije programskog jezika (programski kod 3.1).

```
{
    pinMode(DIGITAL5, INPUT); //Port DIGITAL5 postaje ulazni
    vr = digitalRead(DIGITAL5); //Očitavamo vrijednost na pinu DIGITAL5
}
```

Programski kod 3.1 Konfiguracija digitalnih portova Wasmote platforme

Ukoliko želimo da neki od digitalnih portova koristimo kao izlazni i postavimo na njega neku logičku vrijednost (visok ili nizak logički nivo), koristi se programski kod 3.2.

```
{
    pinMode(DIGITAL5, OUTPUT); // port DIGITAL5 postaje izlazni
    digitalWrite(DIGITAL5, HIGH); //Upisujemo logičku jedinicu
}
```

Programski kod 3.2 Konfiguracija izlaznog porta Waspote platforme

Waspote posjeduje i sedam analognih portova, koji se mogu koristiti za očitavanje analognih signala. Povezani su direktno sa mikrokontrolerom, koji koristi 10-bitni analogno-digitalni konvertor (ADC) sa sukcesivnom aproksimacijom. Maksimalni napon koji se može dovesti na analogne pinove platforme je jednak radnom naponu, tj. 3.3V. Kako je ADC 10-bitni, vrijednosti konvertovanog napona mogu biti između 0 i 1023, što odgovara naponskom nivou između 0V i 3.3V. Dakle, vrijednost 0 na izlazu iz konvertora predstavlja 0V dok vrijednost 1023 predstavlja 3.3V. Naponska rezolucija, odnosno korak ADC-a iznosi 3.22mV, što znači da se očitavanje analognog napona vrši sa greškom uslijed ove nepreciznosti. Vrijednost analognog napona se može očitati ugrađenom funkcijom programskog jezika, *analogRead* (programski kod 3.3)

```
{
    vr = analogRead(ANALOG1); //Očitavamo vrijednosti na pinu ANALOG1
}
```

Programski kod 3.3 Očitavanje analognog porta Waspote platforme

gdje se u promjenljivoj vr nalazi konvertovana vrijednost analognog napona dovedenog na pin ANALOG1. Bitno je napomenuti da je analogne portove Waspote platforme moguće koristiti i kao ulazno/izlazne digitalne portove. Veza imena promjenljivih između analognih i digitalnih portova prikazana je u tabeli 3.3.

Tabela 3.3 Veza imena promjenljivih između analognih i digitalnih portova na Waspote platformi

Analogni pin	Digitalni pin
ANALOG1	14
ANALOG2	15
ANALOG3	16
ANALOG4	17
ANALOG5	18
ANALOG6	19
ANALOG7	20

Na Wasp mote platformi se nalaze i dva UART porta, koji se označavaju sa UART0 i UART1. Postoji mnogo drugih portova koji se mogu povezati sa UART portom. To se vrši preko dva multipleksera, po jedan za svaki UART port.

- UART0 dijele USB port i port Radio socket 0. Preko Radio socket 0 povezuju se komunikacioni moduli kao što su XBee, LoRaWAN, LoRa, Sigfox, RFID/NFC, Bluetooth, WiFi, itd. Multiplekser na ovom UART-u kontroliše prenos podataka i podešen je tako da propušta signal sa porta Radio socket 0. Ukoliko se obavlja komunikacija putem USB porta, multiplekser prebacuje prenos podataka na USB i nakon izvršavanja radnje prenos podataka se opet vrši preko Radio socket 0.
- UART1 koriste četiri porta: Radio socket 1, Auxiliar 1, Auxiliar 2 i GPS port. Moguće je u istom programu konfigurisati koji od četiri porta koristi UART1 port, tj. koji port će multiplekser propustiti na svom izlazu. Konfiguracija multipleksera u kodu se realizuje korišćenjem programskog koda 3.4.

```
{  
    Utils.setMuxAux1(); //Propuštanje Auxiliar 1 porta  
    Utils.setMuxAux2(); // Propuštanje Auxiliar 2 porta  
    Utils.setMuxGPS(); // Propuštanje GPS porta  
    Utils.setMuxSocket1(); // Propuštanje Radio socket 1 porta  
}
```

Programski kod 3.4 Softverska konfiguracija multipleksera

USB port se koristi pri komunikaciji Wasp mote platforme sa računarom ili drugim kompatibilnim uređajima. Komunikacijom putem USB-a se takođe omogućava upisivanje programskog koda u platformu. Kao što je prethodno pomenuto, kod komunikacije putem USB-a koristi se UART0, dok se konverzija u USB standard vrši preko FT232RL čipa [27].

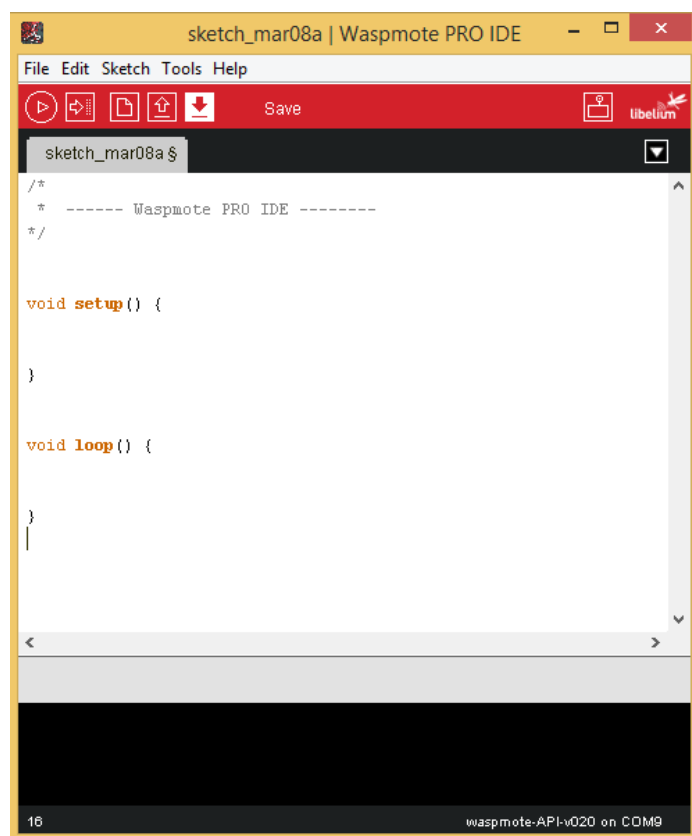
Kod komunikacije Wasp mote platforme sa mikro SD karticom koristi se SPI port. Kontrola SPI magistrale, kao i sve operacije koje se izvršavaju putem nje, vrše se korišćenjem odgovarajućih bibliotekskih funkcija. SPI port je takođe dostupan na SPI-UART konektoru kao i na Radio socket 0.

Wasp mote platforma ima implementiran i I²C protokol komunikacije. Putem ovog protokola vrši se povezivanje akcelerometra, krypto autentifikatora i RTC-a sa mikrokontrolerom. U ovom slučaju mikrokontroler je konfigurisan kao *master* uređaj, dok su navedeni uređaji povezani na I²C magistralu konfigurisani kao *slave* uređaji.

Wasp mote ima ugrađen interni časovnik, u vidu Maxim DS1337C RTC čipa, koji radi na frekvenciji od 32.768 kHz. RTC omogućava realizaciju aplikacija koje zavise od realnog vremena. Pomoću RTC čipa moguće je inicijalizovati alarme koji služe za tzv. buđenje Wasp mote platforme iz stanja spavanja (eng. *Sleep mode*). Omogućeno je da platforma uđe u stanje *Deep Sleep* ili *Hibernate* zbog čuvanja energije, kao i njeno buđenje u precizno definisanim vremenskim intervalima. Što se tiče napajanja, RTC koristi istu bateriju kojom se

napaja i Wasmote. Dakle, ukoliko je za realizaciju neke aplikacije potreban interni časovnik, neophodno je korišćenje Li-ion baterije bez obzira na to da li imamo konstantno napajanje putem USB kablova.

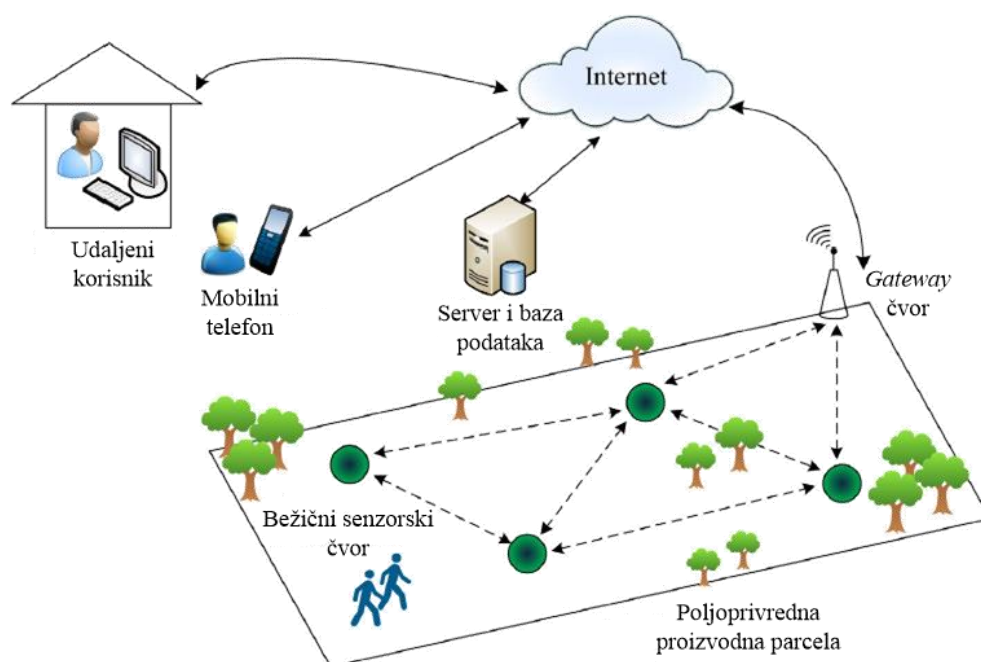
Kao alat za razvoj softvera Wasmote koristi Wasmote PRO IDE razvojno okruženje (slika 3.12). Razvojno okruženje je dizajnirano da bude što je moguće više kompatibilno sa programskim okruženjem Arduino IDE. Wasmote PRO IDE omogućava pisanje programa i upisivanje programskog koda u Wasmote platformu. Ovim softverom se može pratiti serijska komunikacija između platforme i računara preko USB porta, što se često koristi za otkrivanje grešaka tokom razvoja programa. Takođe, posredstvom ove komunikacije se može pratiti rad realizovanog uređaja. Razvojno okruženje se može besplatno preuzeti sa sajta proizvođača, i to verzije softvera za Windows, Mac i Linux operativne sisteme. Kao i kod Arduina, Wasmote koristi jezik veoma sličan standardnim C/C++ programskim jezicima. Program napisan u Wasmote PRO IDE razvojnom okruženju čuva se sa ekstenzijom „.pde“. Razvojno okruženje takođe omogućava rad sa fajlovima „.c“, „.cpp“ i „.h“ ekstenzije. Svaki program napisan za Wasmote platformu mora sadržati dvije osnovne funkcije, *setup()* i *loop()*. Funkcija *setup()* izvršava se samo jednom, prilikom startovanja programa odnosno aktiviranja platforme. U njoj se obično izvrše inicijalna osnovna podešavanja sistema. U funkciji *loop()*, program se iterativno izvršava kao u beskonačnoj petlji. Dakle, kada program krene u izvršavanje *loop()* funkcije, ista će se izvršavati sve dok se platforma ne isključi sa izvora napajanja ili ne restartuje.



Slika 3.12 Wasmote PRO IDE razvojno okruženje

3.2 Bežična senzorska mreža

Korišćenjem različitih elektro-mehaničkih senzora, mikroprocesora i radio modula male potrošnje, razvijeni su multi-funkcionalni, minijturni, senzorski uređaji male snage, koji mogu posmatrati neki fenomen i reagovati na fizičke promjene u njihovoj okolini. Kada se ovi senzorski uređaji, tj. senzorski čvorovi, povežu, preko bežičnog medijuma, formira se bežična senzorska mreža (WSN - eng. *Wireless Sensor Network*) [28], [29]. WSN se obično sastoji od velikog broja senzorskih čvorova koji su relativno gusto prostorno raspoređeni. Položaj senzorskih čvorova ne mora biti projektovan ili unaprijed određen. Time se omogućava njihov slučajan raspored na nepristupačnim terenima. S druge strane, to takođe znači da komunikacioni protokoli i algoritmi moraju imati sposobnost da samostalno organizuju mrežu. Još jedna jedinstvena karakteristika senzorskih mreža jeste mogućnost obrade podataka na samom čvoru. Naime, umjesto slanja sirovih podataka, senzorski čvorovi koriste ugrađene mikroprocesore za lokalno obavljanje jednostavnih proračuna i tako prenose samo potrebne ili djelimično obrađene podatke. Senzorski čvorovi razmjenjuju ove podatke, korišćenjem odgovarajućeg komunikacionog protokola koji se implementira u mreži, i šalju ih dalje prema *gateway* čvoru. Ovaj čvor ima zadatak da omogući komunikaciju između senzorske mreže i udaljenog servera. Dakle, *gateway* čvor prilagođava pakete podataka koji se generišu u senzorskoj mreži Internet protokol steku. Kada se podaci proslijede, preko *gateway-a*, na udaljeni server, vrši se dalja obrada podataka zavisno od tipa aplikacije i zahtjeva korisnika. Udaljeni korisnik može poslati komande i zadatke senzorskoj mreži, preko *sink* čvora, za prikupljanje, obradu i transfer podataka sa senzora. Kasnije, takođe putem *gateway-a*, korisnik može prihvatiti podatke koji se očitavaju senzorskom mrežom. Na slici 3.13 dat je šematski prikaz jednog primjera primjene bežične senzorske mreže u poljoprivredi.



Slika 3.13 Primjer primjene WSN u poljoprivredi [30]

Senzorske mreže se mogu sastojati od mnoštva senzorskih čvorova sa različitim tipovima senzora. Koriste se za kontinuirano praćenje, detekciju događaja, pravovremeno reagovanje u alarmnim situacijama, kontrolu aktuatorskih i drugih uređaja, itd. Koncept mikromjerenja, zajedno sa bežičnom komunikacijom, obezbjeđuje veoma veliki broj, kao i raznovrsnost, mogućih aplikacija. Mogu se koristiti u medicini, monitoringu i zaštiti životne sredine, u vojne svrhe, i mnogim drugim aplikacijama. Bežične senzorske mreže mogu naći svoju primjenu i u poljoprivredi, što je svakako jedan od fokusa ovog rada.

U medicini, WSN se može primijeniti kod praćenja pacijenata i doktora unutar bolnice. Na primjer, pacijenti mogu imati senzorske čvorove na sebi opremljene sensorima za praćenje otkucaja srca, krvnog pritiska, itd. Dok bi doktori mogli imati uređaje koji će pomoći drugim doktorima da ih lociraju unutar bolnice. Drugi primjer bi mogao pomoći kod administracije lijekova u bolnicama. To bi smanjilo mogućnost pogrešnog prepisivanja lijekova pacijentima. Ukoliko imamo senzorske čvorove zakačene na lijekove, a druge senzorske čvorove, koji posjeduju lične informacije, kod pacijenata, mogli bi međusobno komunicirati i reagovati u slučaju da je pacijent alergičan na dati lijek i time spriječiti neželjene efekte [31].

Kod monitoringa životne sredine, bežične senzorske mreže se mogu koristiti pri detektovanju šumskih požara. Kako raspored senzorskih čvorova može biti slučajan a njihov broj veliki, detekcija požara bi se mogla obavljati veoma brzo, i informacija o požaru može stići do krajnjeg korisnika prije nego što požar dobije veće razmjere. Dalje, kod detekcije poplava imamo primjer ALERT sistema [32], postavljenog u SAD. Uređaji ovog sistema sadrže senzore za kišu, nivo vode kao i druge senzore za praćenje vremenskih prilika. Svi ovi uređaji šalju informacije u centralizovanu bazu podataka, radi dalje analize. WSN se može koristiti i kod posmatranja različitih ekosistema, biodiverziteta, migracija životinja, itd.

Vojne aplikacije su takođe jedan od pravaca razvoja bežičnih senzorskih mreža. Jedan od primjera bi mogao biti monitoring položaja i kretanja neprijateljskih trupa, količina naoružanja i slično.

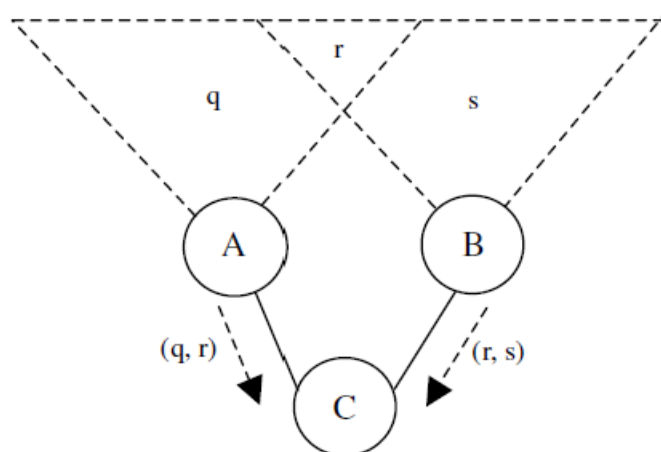
Kod poljoprivrede, senzorski čvorovi mogu se koristiti za praćenje klimatskih uslova u različitim zonama velikih usjeva i obradivih površina. Analizom prikupljenih podataka moguće je izračunati različite potrebe za vodom ili hemikalijama za tretiranje biljaka. U realizaciji sistema za pametno navodnjavanje, prikazanoj u ovom radu, korišćenjem bežične senzorske mreže dobija se informacija o količini vlage u zemljištu. Senzorskih čvorovi, opremljeni sa sensorima za mjerenje vlažnosti zemljišta, prikupljaju informacija o količini vlage u zemljištu, gdje se na osnovu ove informacije određuje optimalan period navodnjavanja za kulturu koja se uzgaja, što će biti objašnjeno u četvrtom poglavlju.

U daljem tekstu biće date najvažnije karakteristike bežičnih senzorskih mreža sa fokusom na ZigBee bežičnu senzorsku mrežu, kakva je korišćena u realizaciji sistema koji je predmet ovog rada.

3.2.1 Karakteristike bežične senzorske mreže

Kod konstruisanja bežične senzorske mreže mora se voditi računa o tipu aplikacije kojoj je mreža namijenjena. Ovo je veoma važno zbog izbora topologije mreže kao i protokola rutiranja koji će se primijeniti. Sistemi gdje se WSN primjenjuje se često dijele na proaktivne i reaktivne. Proaktivne sisteme definišu veliki *sleep* periodi, kao i predefinisani periodi buđenja senzorskih čvorova nakon čega svi senzorski čvorovi u mreži prikupljaju podatke sa senzora i/ili prosleđuju iste do krajnjeg korisnika (uređaja). Reaktivni sistemi, za razliku od proaktivnih, imaju manji *sleep* period i kod njih senzorski čvorovi moraju stalno osluškivati naredbe korisnika. Dakle, ovi sistemi reaguju kada korisnik želi da dobije neku informaciju ili da unese neke izmjene u konfiguraciju mreže i senzorskih čvorova.

Raspored senzorskih čvorova na mjestu instalacije je veoma bitan kod izbora tipa senzorske mreže. Odnosi se na način postavljanja čvorova, tj. njihovu fizičku poziciju u samoj mreži. Senzorski čvorovi mogu biti slučajno ili deterministički postavljeni u sistemu. Raspored čvorova po unaprijed određenim pozicijama u mreži ima brojne prednosti kao što su: ravnomjerna distribucija senzorskih čvorova u mreži, manja interferencija i manje nepotrebnog preklapanja odnosno registrovanja istih podataka između čvorova. Međutim, ovaj pristup nije moguć kod aplikacija na nepristupačnom terenu. U tom slučaju senzorski čvorovi moraju biti slučajno raspoređeni i njihov broj je obično veći. Ovo rezultira preklapanjem podataka između čvorova, koje se naziva redundantnost podataka (slika 3.14).



Slika 3.14 Problem redundantnosti podataka. Senzorski čvorovi A i B imaju preklapanje i zajedno šalju informacije o oblasti r čvoru C [33].

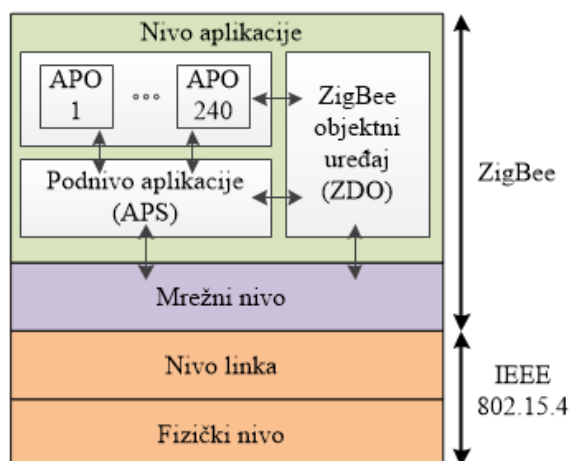
Topologija mreže odnosi se na to kako su senzorski čvorovi raspoređeni i povezani u senzorskoj mreži. Bez obzira na to da li su senzorski čvorovi deterministički ili slučajno raspoređeni, topologija mreže može biti različita. Izbor topologije mreže utiče na način protoka podataka između senzorskih čvorova. Odgovarajuća topologija mreže mora da omogući protok podataka naprijed i nazad između čvorova ili do mrežnog *gateway*-a. Tri osnovne topologije, za primjenu u bežičnim senzorskim mrežama su: zvijezda, stablo i *mesh*.

Osim topologije mreže potrebno je definisati način rutiranja paketa u bežičnoj senzorskoj mreži. Kako senzorski čvorovi imaju ograničenu brzinu prenosa podataka, obično raspoređeni na nepristupačnim predjelima i u velikom broju, a takođe opremljeni baterijskim napajanjem, potrebno je optimizovati potrošnju energije. Dakle, potrebno je koristiti energetske efikasne protokole rutiranja, sa pouzdanom komunikacijom i razmjenom podataka između čvorova, kako bi bežična senzorska mreža bila funkcionalna što više vremena.

Konstruisanje bežične senzorske mreže u najvećoj mjeri zavisi od tipa aplikacije. Iz tog razloga, izbor topologije i protokola rutiranja mreže mora biti prilagođen njenoj namjeni. Ukoliko se mrežom prenose skalarni podaci, brzina prenosa podataka nije od velike važnosti. U tom slučaju, veći značaj treba pridati uštedi energije i dugotrajnosti mreže. Među najpopularnijim tipovima bežičnih senzorskih mreža, male potrošnje i sa malom brzinom prenosa podataka, izdvajaju se mreže bazirane na ZigBee tehnologiji odnosno ZigBee standardu. Ovim standardom definišu se protokoli viših nivoa u protokol steku i ima veoma široku primjenu u oblasti bežičnih senzorskih mreža male potrošnje i pristupačne cijene.

3.2.2 ZigBee bežične senzorske mreže

ZigBee predstavlja standardizaciju viših funkcionalnih nivoa u protokol steku, i to nivoa aplikacije i mrežnog nivoa. Nivo aplikacije daje okvir za razvoj aplikacija i komunikaciju među objektima aplikacije. Mrežni nivo organizuje mrežu i omogućava rutiranje paketa. Mrežni nivo ZigBee standarda oslanja se na IEEE 802.15.4 standard koji definiše nivo linka i fizički nivo [28]. Šematski prikaz protokol steka ZigBee standarda prikazan je na slici 3.15.



Slika 3.15 Arhitektura funkcionalnih nivoa i protokol stek ZigBee standarda

Nivo aplikacije kod ZigBee standarda sadrži objekte aplikacije (APO – eng. *Application Objects*), ZigBee objektne uređaje (ZDO – eng. *ZigBee Device Objects*) i podnivo aplikacije (APS – eng. *Application Sub Layer*). ZigBee aplikacija se sastoji od objekata aplikacije koji su raspoređeni na nekoliko senzorskih čvorova u mreži. Ovi objekti predstavljaju softver koji kontroliše hardverske komponente dostupne na uređaju (senzore, aktuatore, itd.). Jedan ZigBee uređaj može imati do 240 objekata aplikacije, koji se takođe mogu nazvati krajnjim uređajima. Svakom objektu aplikacije se lokalno dodjeljuje jedinstven broj, koji drugi objekti koriste kao ekstenziju adrese tog uređaja radi lakšeg povezivanja i pronalaženja u mreži. ZigBee objektni uređaj je specijalan objekat koji nudi servise objektima aplikacije. Omogućava im pronalaženje uređaja u mreži i servisa koji ti uređaji nude. Takođe, pruža servise komunikacije, umrežavanja i sigurnosti. Podnivo aplikacije obezbjeđuje interfejs za sigurnost i razmjenu podataka za objekte aplikacije i ZigBee objektne uređaje.

Glavna odlika mrežnog nivoa jeste kreiranje topologije mreže odnosno hijerarhije u komunikaciji između senzorskih čvorova u mreži. U mrežnom nivou protokol steka ZigBee definiše tri tipa uređaja, tj. čvorova: krajnji uređaj, ruter i koordinator. Krajnji uređaj je najjednostavniji tip uređaja u ZigBee mreži. Nema mogućnost da dozvoli drugim uređajima da se pridruže mreži, a takođe ne može pomoći kod rutiranja podataka u mreži. Krajnji uređaj se može povezati sa drugim krajnjim uređajem samo preko roditeljskog čvora koji je obično ruter.

Jedna od prednosti ovog tipa uređaja u mreži jeste mogućnost ulaska u režim spavanja ukoliko ne prenosi podatke. Ruter je uređaj koji ima mogućnost rutiranja paketa u mreži, a takođe može da omogući pridruživanje novog uređaja mreži. Koordinator je uređaj koji formira mrežu i upravlja njome. Takođe, može učestvovati u rutiranju paketa u mreži *mesh* topologije. Tek nakon što koordinator formira mrežu moguće je pridruživanje rutera i krajnjih uređaja.

Nivo linka kod ZigBee uređaja, zajedno sa fizičkim nivoom definisan je IEEE 802.15.4 standardom. Ovim standardom se definišu dva tipa uređaja: uređaj ograničene funkcionalnosti (eng. *Reduced Function Device*, RFD) i uređaj sa potpunom funkcionalnošću (eng. *Full Function Device*, FFD). FFD je opremljen sa kompletnim setom funkcija koje sadrži MAC nivo, što mu omogućava da se u senzorskoj mreži ponaša kao krajnji uređaj ili koordinator. Ukoliko je FFD konfigurisan kao koordinator, on omogućava sinhronizaciju, komunikaciju i servise za pristupanje mreži ostalim senzorskim čvorovima. RFD može biti konfigurisan samo kao krajnji uređaj. Može komunicirati samo sa jednim FFD-om i opremljen je sa sensorima/aktuatorima).

Fizički nivo kontroliše aktivaciju/deaktivaciju radio modula, prijem i slanje podataka. Ujedno, obavlja odabir frekvencije kanala. Takođe, fizički sloj vrši provjeru da li je komunikacioni kanal zauzet, odnosno da li se neki podaci trenutno šalju komunikacionim kanalom.

Senzorski čvorovi koji koriste ZigBee standard imaju domet komunikacije od 10 m do 100 m, u zavisnosti od režima rada fizičkog sloja i mjesta gdje su uređaji raspoređeni. Frekvencije definisane ovim standardom raspoređene su na 27 različitih kanala, u tri opsega:

- 868.0 – 868.6 MHz – 1 kanal (Evropa)
- 902.0 – 928.0 MHz – 10 kanala (SAD)
- 2.40 – 2.48GHz – 16 kanala (globalno, ISM opseg)

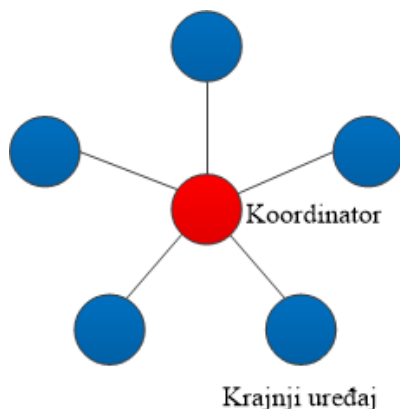
Brzina prenosa podataka u navedenim frekvencijskim opsezima je sljedeća:

- 868.0 – 868.6 MHz → 20/100/250 Kb/s
- 902.0 – 928.0 MHz → 40/250 Kb/s
- 2.40 – 2.48GHz → 250 Kb/s

Kod konfigurisanja ZigBee bežične senzorske mreže potrebno je definisati njenu topologiju. Od vrste topologije kasnije zavisi način rutiranja podataka u mreži. ZigBee standardom se definišu specifikacije mrežnog nivoa za tri topologije mreže: zvijezda, stablo i *mesh*.

U ZigBee bežičnoj senzorskoj mreži koja ima topologiju zvijezde, glavni čvor zauzima centralnu poziciju u mreži i ima funkciju koordinatora mreže (slika 3.16). Periferni čvorovi komuniciraju jedni sa drugima posredstvom centralnog čvora, koji pojačava signal i prosleđuje poruke do željenog čvora. Centralni čvor može raditi u dva moda:

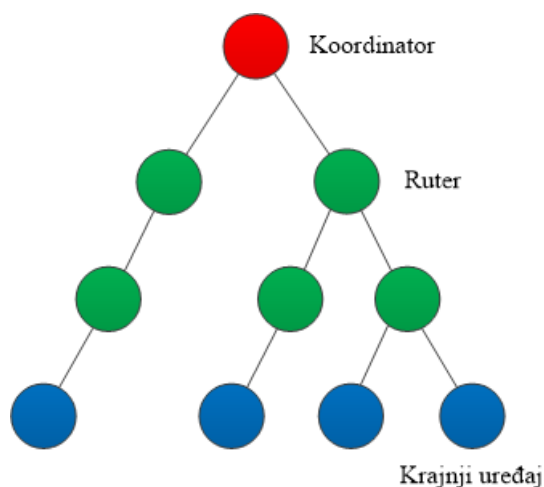
- Aktivni – poruka se provjerava na prijemu, prije prosleđivanja
- Pasivni – poruka se automatski prosleđuje



Slika 3.16 Topologija zvijezde u ZigBee mrežama

Prednosti topologije zvijezde su: skalabilnost, energetska efikasnost, laka instalacija i rekonfiguracija čvorova i podaci se prenose preko konačnog broja čvorova. Mana ovakve topologije mreže jeste ograničenje u dometu. Maksimalna površina na koju se može implementirati ograničena je maksimalnim dometom pojedinih čvorova.

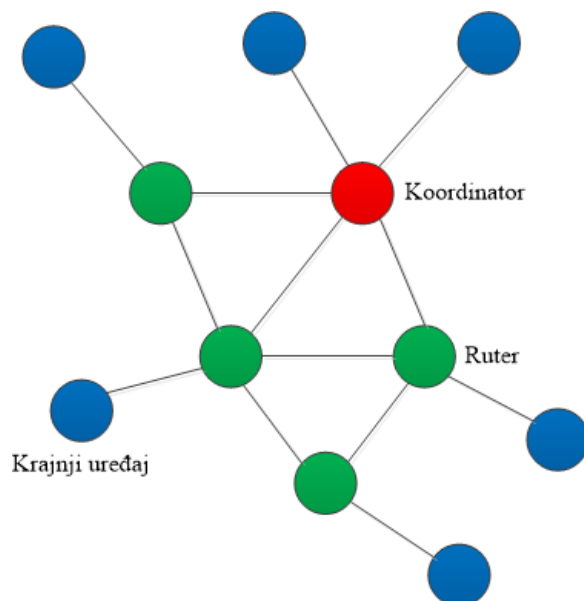
Struktura stabla je hijerarhijska topologija koja počinje sa *root* čvorom, kao što je prikazano na slici 3.17. Ovaj čvor ima ulogu koordinatora mreže. Od *root* čvora, stablo se grana u listove, gdje broj grananja zavisi od faktora f . Ukoliko je $f = 1$, topologija je linearna, a ukoliko je $f = n$, svaki senzorski čvor može imati do n listova koji se granaju iz čvora. Krajnji uređaji predstavljaju čvorove posle kojih grananje prestaje. Ostali čvorovi imaju ulogu rutera u ovakvoj topologiji. Najveća količina informacija prolazi kroz glavne grane, koje su povezane sa *root* čvorom. U ovakvoj topologiji, senzorski čvorovi komuniciraju putem *point-to-point* linkova.



Slika 3.17 Topologija stabla u ZigBee mrežama sa faktorom grananja $f=2$

Kod ovakve strukture mreže, prednosti se ogledaju u skalabilnosti i lakom praćenju protoka podataka. Mane su: zavisnost mreže od glavne grane kao i činjenica da način povezivanja među senzorskim čvorovima mora biti predefinisano.

Odlika *mesh* topologije predstavlja mogućnost da senzorski čvor komunicira (prenosi podatke) sa bilo kojim susjednim čvorom (slika 3.18). Kada se neki podatak prenosi sa jednog čvora, ostali čvorovi se ponašaju kao ruteri i prosleđuju podatak do senzorskog čvora kome je podatak namijenjen. U *mesh* mrežama, cilj je najčešće da se izabere najkraća (optimalna) putanja za prenos podataka. Time se štedi energija i povećava brzina protoka informacija.



Slika 3.18 Mesh topologija u ZigBee mrežama

Prednosti ove topologije su: skalabilnost zbog *multi-hop* arhitekture, lako izolovanje i nalaženje grešaka u mreži kao i mogućnost promjene rute za prenos podataka ukoliko dođe do kvara na susjednom čvoru. Mana ovakve strukture ogleda se u komplikovanoj instalaciji i rekonfiguraciji senzorskih čvorova, naročito kod dodavanja novog čvora.

Kao protokol rutiranja u ZigBee mrežama koristi se AODV (eng. *Ad hoc On-Demand Distance Vector*) protokol [34]. Pronalaženje optimalne rute, korišćenjem AODV protokola, obavlja se tako što se informacija o ruti upisuje u tabelu. One su smještene u memoriji senzorskih čvorova koji mogu vršiti prosleđivanje paketa (ruter i koordinator). U ovim tabelama nalazi se adresa sljedećeg „skoka“ (eng. *hop*). Zapravo, u tabeli se čuva adresa senzorskog čvora koji se nalazi između čvora koji šalje paket i čvora kome je paket namijenjen. Kada senzorski čvor koji šalje paket želi da otkrije optimalnu rutu do željenog čvora, on šalje *broadcast* zahtjev za nalaženje rute svim čvorovima u mreži. *Broadcast* zahtjev za nalaženje rute sadrži adresu čvora koji emituje poruku, adresu čvora kome je poruka namijenjena kao i podatak o kvalitetu rute. Kada čvorovi u mreži prihvate ovaj zahtjev, prosleđuju isti *broadcast* zahtjev sa dopunjenom podatkom o kvalitetu rute. Dakle, kada zahtjev konačno stigne do čvora kome je namijenjen, on sadrži kompletnu informaciju o kvalitetu rute kojom je poslat. Kako se

inicijalno zahtjev prenosi svakom mogućom rutom, traži se najpovoljniji scenario za prenos paketa do čvora kome je namijenjen. Nakon utvrđivanja najbolje rute, informacija za prenos paketa tj. informacija o najoptimalnijoj ruti šalje se čvoru koji je izvor poruke.

3.3 GSM/GPRS komunikacija

Kod predloženog rješenja sistema za pametno navodnjavanje, konfigurisanje sistema kao i aktivacija/deaktivacija ventila, može se vršiti korišćenjem SMS servisa, slanjem za to definisanih komandi. Takođe, informacije o količini vode predate zemljištu putem navodnjavanja kao i podaci o trenucima aktivacije/deaktivacije ventila šalju se na udaljeni server, odnosno na *Livegate* platformu radi vizualizacije i dalje analize. Ujedno, omogućeno je da ove informacije korisnik dobije i u vidu SMS izvještaja. Iz svega navedenog proizilazi da je u realizaciji sistema za pametno navodnjavanje od velike važnosti bilo uspostavljanje GSM/GPRS konekcije. Korišćenje SMS servisa, kao i omogućavanje slanja podataka na udaljeni server u predloženom sistemu za pametno navodnjavanje, uslovilo je korišćenje GSM/GPRS modula.

3.3.1 Waspote GSM/GPRS modul SIM900

Kako se konfigurisanje sistema i izvještavanje korisnika realizuje putem SMS servisa, a komunikacija sa udaljenim serverom vrši HTTP protokolom, u realizaciji sistema za pametno navodnjavanje korišćen je Waspote GSM/GPRS modul SIM900 (slika 3.19). Ovaj modul je specijalno dizajniran za laku integraciju sa Waspote platformom. Korišćenjem odgovarajućih, već realizovanih biblioteka, moguće je lako uspostavljanje GSM/GPRS konekcije. Modul se lako povezuje sa Waspote platformom, korišćenjem *Radio socket 1* konektora, gdje se komunikacija vrši putem UART1 serijskog porta. Waspote GSM/GPRS modul bazira se na SIM900 bežičnom modulu, razvijenom od strane SIMCom kompanije [35]. SIM900 je veoma pouzdan i kompaktan *Quad-band* GSM/GPRS bežični modul sa moćnim *single-chip* procesorom koji koristi AMR926EJ-S jezgro [36].



Slika 3.19 Waspote GSM/GPRS modul

Waspote GSM/GPRS modul podržava četiri frekvencijska opsega: 850MHz, 900MHz, 1800MHz i 1900MHz [37]. Prije korišćenja modula potrebno je umetnuti SIM karticu u slot, koji se nalazi sa donje strane modula. Na modulu se takođe nalazi UFL konektor, na koji je neophodno povezati antenu za uspostavljanje GSM/GPRS konekcije. Korišćenje ovog modula omogućava:

- obavljanje poziva,
- prijem/slanje SMS-ova,
- uspostavljanje TCP/IP ili UDP/IP klijentske konekcije,
- pokretanje TCP/IP servera,
- HTTP i FTP servise.

Da bi se omogućila upotreba modula neophodno je koristiti WaspGPRS_Pro.h biblioteku. Ova biblioteka je inicijalno instalirana zajedno sa Waspote IDE razvojnim okruženjem, i nije je potrebno naknadno preuzimati sa interneta, nakon preuzimanja razvojnog okruženja. Potrebno je samo uključiti biblioteku na početku programa, naredbom `#include` (programski kod 3.5).

```
#include <WaspGPRS_Pro.h> // Uključivanje biblioteke za GSM/GPRS modul
```

Programski kod 3.5 Uključivanje biblioteke za GSM/GPRS modul

Za korišćenje funkcija definisanih ovom bibliotekom potrebno je koristiti *public* objekat GPRS_Pro, koji je definisan unutar nje. Dalje, da bi omogućili komunikaciju sa telekomunikacionim operatorom, u programu je potrebno inicijalizovati parametre mreže kao što su: APN (eng. *Access Point Name*), *login* i *password* (programski kod 3.6).

```
#define APN "tmcg-data" // APN Crnogorskog Telekom operatora
#define LOGIN "38267" // Login Crnogorskog Telekom operatora
#define PASSWORD "38267" // Password Crnogorskog Telekom operatora
```

Programski kod 3.6 Inicijalizacija parametara mreže

Nakon što podesimo parametre mreže, potrebno je otvoriti *socket* i aktivirati modul. GSM/GPRS modul je povezan na multiplexer mikroprocesorske platforme preko UART1 porta, koji mora biti ispravno podešen da bi se omogućilo korišćenje modula (vidi poglavlje 3.1.3). Funkcija koja propušta GSM/GPRS port na izlazu multipleksera i otvara *socket* poziva se programskim kodom 3.7.

```
{  
/* Propušta GSM/GPRS port na izlaz multipleksera i otvara socket */  
    GPRS_Pro.ON ();  
}
```

Programski kod 3.7 Otvaranje GSM/GPRS porta

Ukoliko je potrebno zatvoriti *socket* i isključiti GSM/GPRS modul, koristi se funkcija prikazana programskim kodom 3.8.

```
{  
    GPRS_Pro.OFF (); // Zatvara socket i isključuje GSM/GPRS modul  
}
```

Programski kod 3.8 Zatvaranje GSM/GPRS porta

Nakon otvaranja *socket*-a i aktiviranja modula, potrebno je unijeti PIN kod SIM kartice. Ovo je moguće izvršiti korišćenjem funkcije date programskim kodom 3.9.

```
{  
    GPRS_Pro.setPIN("1234"); // Primjer unosa PIN koda na SIM karticu  
}
```

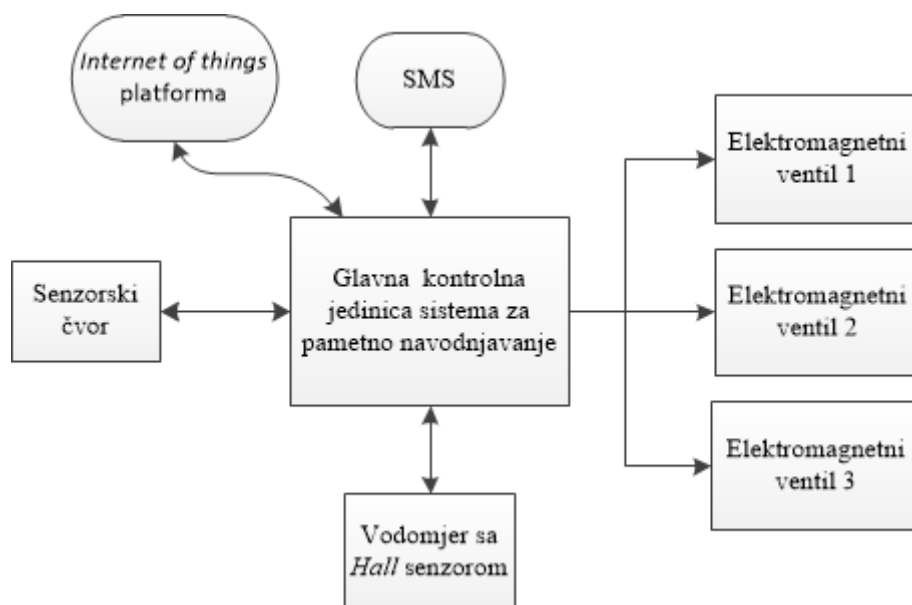
Programski kod 3.9 Unos PIN koda

Navedene funkcije predstavljaju početna podešavanja GSM/GPRS modula bez kojih nije moguće koristiti modul. Kada se izvrše inicijalna podešavanja, omogućava se pozivanje funkcija za korišćenje ostalih funkcionalnosti modula. Funkcije za slanje/prijem SMS-ova, kao i slanje podataka na udaljeni server putem GSM/GPRS modula, upotrijebljene u realizaciji sistema za pametno navodnjavanje, biće detaljno objašnjene u poglavlju 4.1.2, vezanom za konfiguraciju sistema putem SMS komandi.

4 Algoritam za donošenje odluke o aktiviranju sistema za navodnjavanje

Za uspješnu realizaciju efikasnog sistema za pametno navodnjavanje, koji će povećati prinose i uticati na optimalnije korišćenje vodnih resursa, neophodno je donijeti pravilne odluke o trenucima navodnjavanja proizvodne parcele. Da bi se obezbijedio adekvatan raspored navodnjavanja ratarskih kultura, moraju se uzeti u obzir svi relevantni faktori. Dakle, postoji potreba za razvojem algoritma koji će, na osnovu prikupljenih podataka i predefinisanih parametara, omogućiti pravovremenu aktivaciju i deaktivaciju elektromagnetnih ventila za navodnjavanje.

Pravilno funkcionisanje algoritma za pametno navodnjavanje zahtijeva poznavanje fizičkih i vodnih karakteristika zemljišta gdje će se sistem primijeniti, kao i kulture koja će se na tom zemljištu gajiti. Iz tog razloga, neophodno je angažovanje stručnjaka iz oblasti proučavanja zemljišta. Na osnovu laboratorijskih analiza uzoraka zemljišta, određuje se norma navodnjavanja i granična vrijednost vlažnosti zemljišta. Normom navodnjavanja određena je optimalna količina vode koju je potrebno primijeniti na nekoj proizvodnoj parceli tokom jednog procesa navodnjavanja (vidi poglavlje 2.4). Ovu količinu vode je potrebno dodati kada vlažnost zemljišta dostigne određenu graničnu vrijednost, odnosno kada se zemljište dovoljno osuši. Granična vrijednost vlažnosti zemljišta (tenzija) definiše se na osnovu kulture koja se gaji, i uz normu navodnjavanja predstavlja ulazni parametar algoritma. Dakle, radi se o primjeni multidisciplinarnog istraživanja koje omogućava razvoj sistema za optimalnu potrošnju vode, u skladu sa potrebama biljke. Blok šema sistema za pametno navodnjavanje, koji je predmet ovog rada, prikazana je na slici 4.1.



Slika 4.1 Blok šema sistema za pametno navodnjavanje

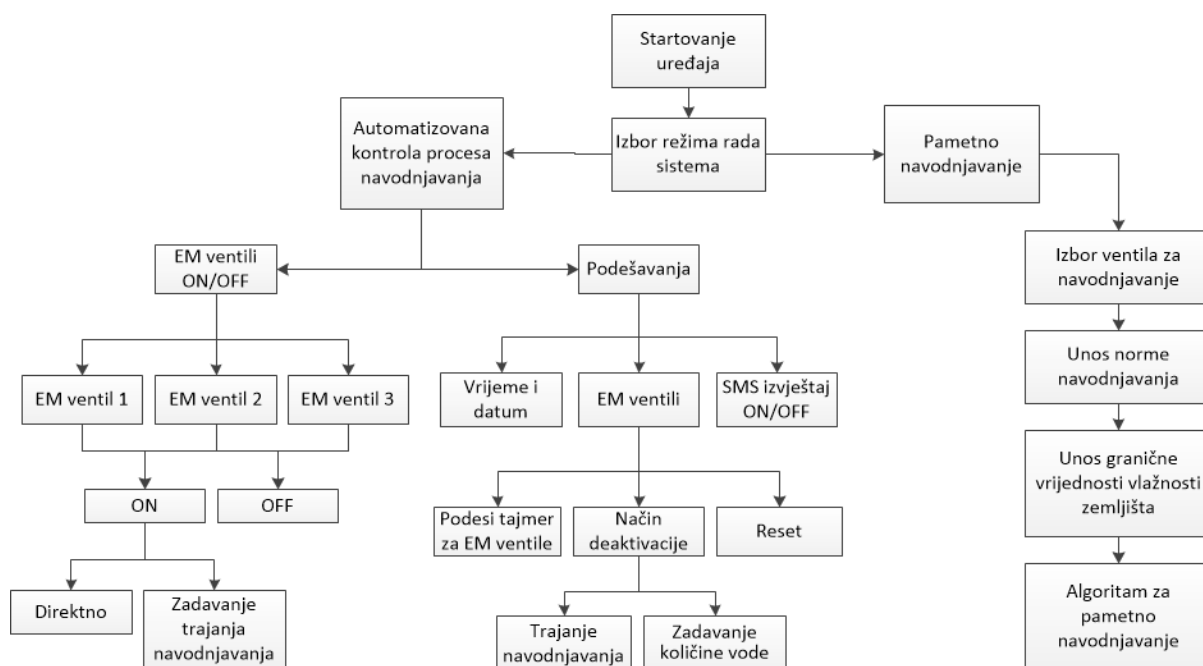
Na glavnoj kontrolnoj jedinici sistema realizovana su dva režima rada:

- automatizacija procesa navodnjavanja, i
- autonoman (pametni) režim rada korišćenjem algoritma za pametno navodnjavanje

Kod automatizacije procesa navodnjavanja, korisnik ima mogućnost da preuzme (trenutno ili u određenom periodu) kontrolu nad sistemom. U ovom režimu rada moguće je zadati vremenske trenutke početka navodnjavanja, dok se proces navodnjavanja završava na osnovu jednog od dva kriterijuma: vremenskog trajanja navodnjavanja ili predate količine vode. Upravljanje i konfiguracija ovog režima rada sistema može se vršiti ručno (putem tastera na glavnoj kontrolnoj jedinici) ili sa udaljene lokacije korišćenjem SMS servisa.

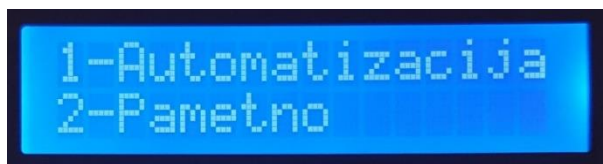
U pametnom režimu rada sistema, navodnjavanje zemljišta se vrši bez intervencije korisnika, na osnovu određenih optimalnih perioda za navodnjavanje, u zavisnosti od ulaznih parametara. Kako je prethodno rečeno, prvo je potrebno laboratorijski izračunati normu navodnjavanja i odrediti graničnu vrijednost vlažnosti zemljišta pri kojoj se započinje navodnjavanje. Ovi parametri se unose na glavnoj kontrolnoj jedinici, prilikom inicijalne konfiguracije sistema. Tokom rada sistema u autonomnom režimu ovi se parametri upoređuju sa podacima dobijenim sa proizvodne parcele putem bežične senzorske mreže, na osnovu čega se donose adekvatne odluke. Na taj način je omogućen samostalan rad sistema, koji na osnovu izmjerenih podataka obezbjeđuje proces tzv. pametnog navodnjavanja.

Na slici 4.2 prikazan je blok dijagram menija sistema za pametno navodnjavanje, koji sadrži sve opcije koje su implementirane u trenutnoj realizaciji ovog sistema.



Slika 4.2 Blok dijagram menija sistema za pametno navodnjavanje

Kako su na sistemu za pametno navodnjavanje implementirana dva režima rada, korisnik ima mogućnost da odabere jedan od njih. Na glavnoj kontrolnoj jedinici se, prilikom startovanja sistema, putem tastera bira režim automatizacije ili pametan režim rada (slika 4.3).



Slika 4.3 Izbor režima rada sistema

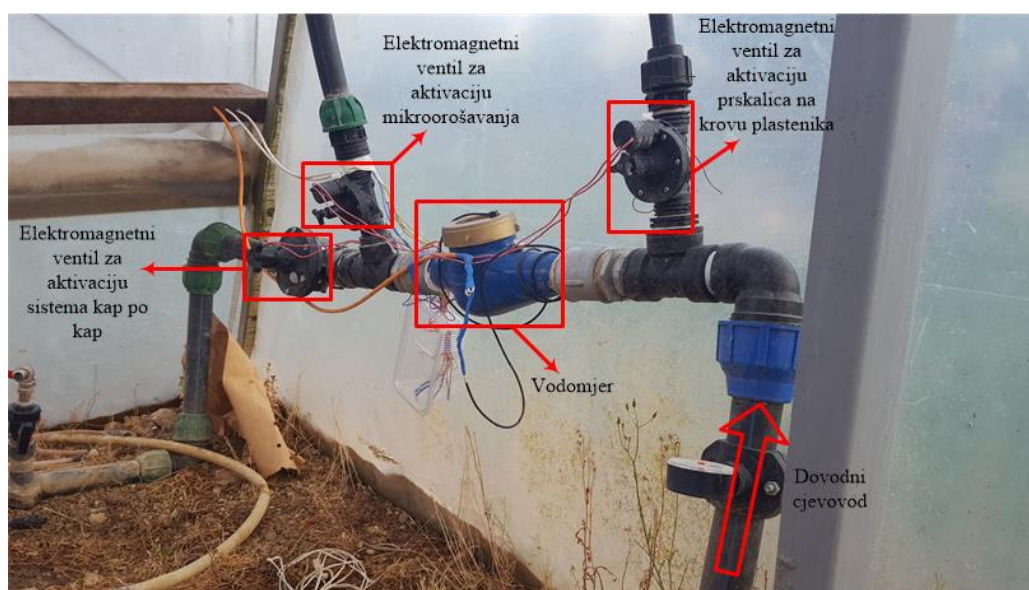
Prototip sistema za pametno navodnjavanje rađen je za potrebe proizvodne parcele u plasteniku, prikazane na slici 4.4, koji ima tri vrste navodnjavanja:

- sistem kap po kap za navodnjavanje korijena biljke;
- sistem za dovođenje vode u vidu sitnih kapi na površinu biljke (mikroorošavanje);
- sistem za izazivanje površinskog sloja leda na krovu plasteniku.

Pomenute vrste navodnjavanja u plasteniku su nezavisne, odnosno na svaku od tri dovodne cijevi za navodnjavanje postavljen je nezavisan elektromagnetni ventil za aktivaciju. Tri elektromagnetna ventila sa vodomjerom, instalirana na oglednoj proizvodnoj parceli, prikazani su na slici 4.5. Pri realizaciji prototipa, bilo je potrebno obezbijediti nezavisnu kontrolu tri cjevovoda za navodnjavanje, pri čemu je (po zahtjevu korisnika) bilo potrebno obezbijediti da ne dođe do preklapanja aktivacije ventila. Ovo znači da u trenutku aktivacije jedne vrste navodnjavanja ostala dva tipa moraju biti neaktivna. Iz tog razloga je korišćenje jednog vodomjera za mjerenje protoka vode, povezanog na glavnu dovodnu cijev, bilo dovoljno. U trenutnoj fazi razvoja, sistem za pametno navodnjavanje ima tri elektromagnetna ventila. Međutim, pri izradi sistema se vodilo računa o njegovoj modularnosti pa je moguća laka modifikacija sistema, za rad sa velikim brojem elektromagnetnih ventila, u skladu sa potrebama korisnika.



Slika 4.4 Ogledna proizvodna parcela



Slika 4.5 Elektromagnetni ventili sa vodomjerom instalirani na oglednoj proizvodnoj parceli

U narednom dijelu biće opisana praktična realizacija sistema za pametno navodnjavanje. Prvo će biti predstavljena automatizovana kontrola procesa navodnjavanja kao i opis funkcionalnosti realizovane automatizacije. Nakon toga, biće prikazan način konfiguracije sistema za pametno navodnjavanje putem SMS komandi. Na kraju, u okviru ovog poglavlja će biti predstavljena realizacija algoritma za pametno navodnjavanje.

4.1 Automatizovana kontrola procesa navodnjavanja

Pod automatizacijom možemo smatrati korišćenje sistema koji vrše kontrolu i upravljaju različitim uređajima i procesima. Automatizacija je veoma značajna jer se štede ljudski resursi, a istovremeno povećava efikasnost i preciznost obavljanja različitih zadataka. Ona se može ostvariti na različite načine koristeći mehaničke, hidraulične, pneumatske, električne, elektronske i računarske sisteme. Kod složenih sistema (npr. moderne fabrike), koristi se kombinacija navedenih resursa. Kako je već rečeno, prilikom realizacije sistema predloženog u ovom radu, pored autonomnog (pametnog) režima rada, realizovana je i automatizovana kontrola procesa navodnjavanja [38]. Razlog za to je potreba korisnika da nekad samostalno donosi odluke o periodima navodnjavanja, nezavisno od informacija prikupljenih sa senzora, odnosno algoritma za pametno navodnjavanje. Bilo je neophodno omogućiti pouzdan i jednostavan proces konfiguracije sistema za automatizaciju navodnjavanja, kako bi korisnik lako mogao da preuzme kontrolu nad sistemom.

Automatizacija sistema omogućava fleksibilnu kontrolu elektromagnetnih ventila za navodnjavanje. Kako bi se obezbijedio efikasan proces kontrole, bilo je potrebno omogućiti da se navodnjavanje vrši prema zadatoj šemi. U ovom režimu rada sistema, korisnik ima mogućnost podešavanja vremenskog rasporeda aktivacije/deaktivacije ventila. Kada korisnik konfiguriše vremenske intervale navodnjavanja, glavna kontrolna jedinica će slijediti tu rutinu svakog dana, sve dok se ne konfigurišu novi vremenski intervali ili ne resetuju postojeći. Postoje dva načina deaktivacije elektromagnetnih ventila, odnosno dva tipa navodnjavanja u automatizovanom režimu rada sistema: prema trajanju navodnjavanja i prema količini predate vode. Dakle, korisnik može da podesi da li želi da isključi navodnjavanje nakon unesenog vremenskog intervala tj. trajanja (predefinisano podešavanje) ili nakon zadate količine vode koja je predata proizvodnoj parceli.

Da bi se omogućio automatizovani režim rada sistema, predložen u ovom radu, bilo je potrebno imati informaciju o količini vode koja je protekla kroz ventil i predata parceli. Stoga je trebalo povezati glavnu kontrolnu jedinicu sistema sa vodomjerom kojeg je moguće daljinski očitati. U tu svrhu je korišćen vodomjer sa odgovarajućim *Hall* senzorom (slika 4.6).

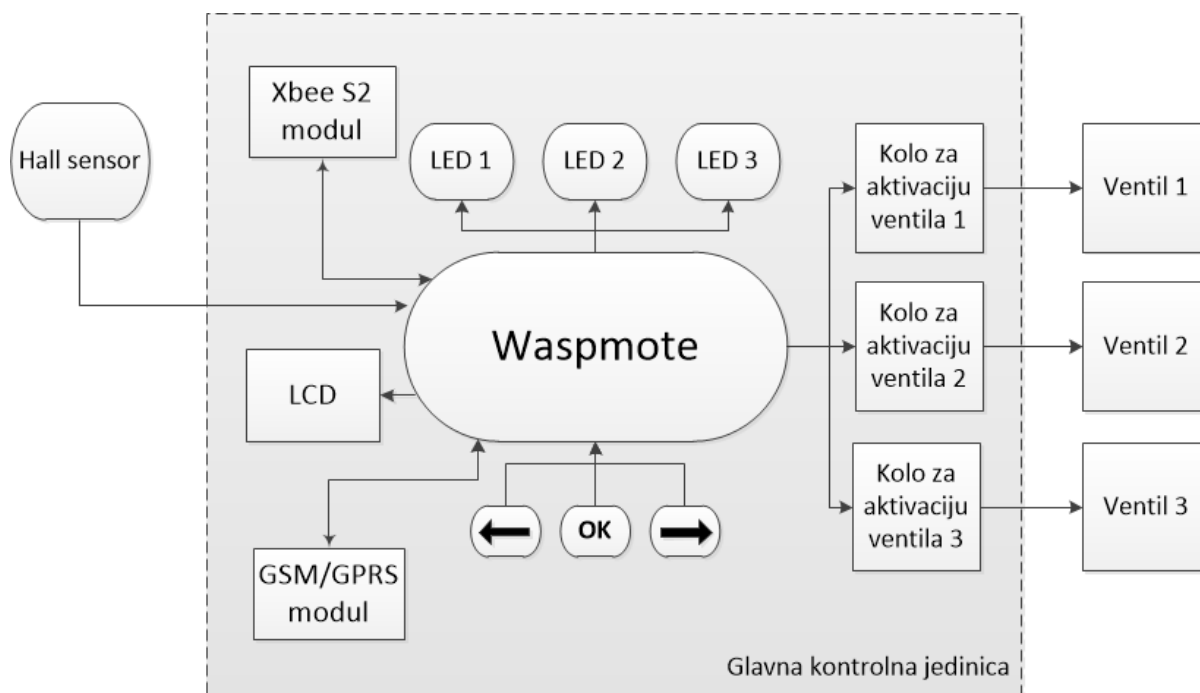


Slika 4.6 Vodomjer sa Hall senzorom

Takođe, bilo je potrebno povezati glavnu kontrolnu jedinicu sa elektromagnetnim ventilima za ispuštanje vode, koji će se aktivirati/deaktivirati po zahtjevu korisnika ili unijetoj konfiguraciji vremena. Na slici 4.7 je prikazana blok šema glavne kontrolne jedinice sistema povezane sa *Hall* senzorom i kolima za aktivaciju elektromagnetnih ventila.

Za potrebe realizacije glavne kontrolne jedinice, na kojoj su implementirani režimi rada automatizovane kontrole i pametnog navodnjavanja, bile su potrebne sljedeće komponente:

- Waspote mikroprocesorska platforma
- GSM/GPRS komunikacioni modul sa antenom
- XBee S2 komunikacioni modul za prijem podataka iz WSN
- 3.7V 6600mAh Li-ion baterija kao dodatni izvor napajanja
- 16x2 LCD displej
- 3 tastera za ručno podešavanje sistema
- 3 LED za indikaciju statusa elektromagnetnih ventila



Slika 4.7 Blok šema glavne kontrolne jedinice sistema povezane sa *Hall* senzorom i kolima za aktivaciju elektromagnetnih ventila

Kao što je rečeno u poglavlju 3, za potrebe obrade velikog broja podataka i implementacije obimnog programa za kontrolu procesa navodnjavanja sa algoritmom za pametno navodnjavanje, korišćena je Wasmote *open-source* mikroprocesorska platforma. U ovoj implementaciji, platforma je nadograđena odgovarajućim komunikacionim modulima. GSM/GPRS modul se koristi za uspostavljanje komunikacije sa *Livegate* platformom i korišćenje SMS servisa, dok se Xbee S2 modul koristi za prijem informacija sa senzorskih čvorova i kontrolu bežične senzorske mreže kod autonomnog (pametnog) režima rada sistema, o čemu će biti riječi u nastavku. Da bi se obezbijedilo pravilno funkcionisanje Wasmote platforme pri korišćenju ovih modula bilo je neophodno koristiti dodatno baterijsko napajanje (vidi poglavlje 3.1.3).

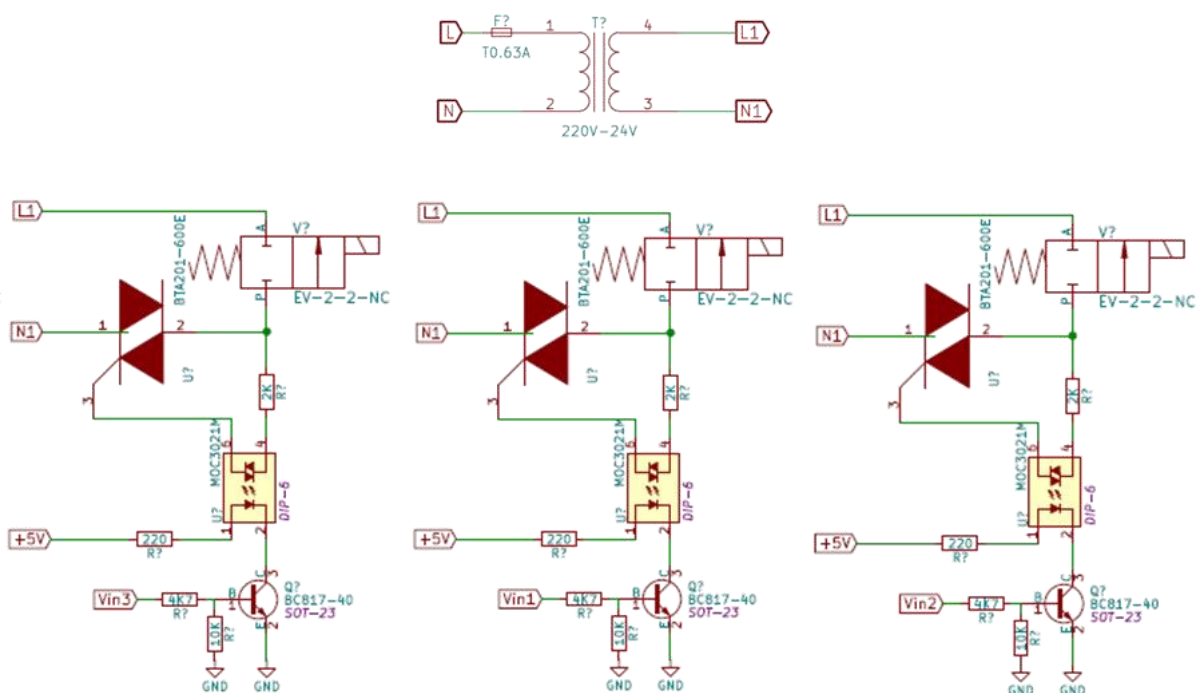
Za prikaz podataka i opcija u meniju sistema na glavnoj kontrolnoj jedinici, korišćen je 16x2 LCD displej. Kontrola i ispis informacija na displeju vrši se putem ulazno/izlaznih portova Wasmote platforme, a ujedno se sa platforme dovodi potrebno napajanje od 5V.

Kako je potrebno podešavati sistem, odnosno unositi prethodno navedene konfiguracione podatke, od velike važnosti bila je realizacija korisničkog interfejsa za lak i jednostavan unos ovih podataka. Dakle, neophodno je bilo obezbijediti mogućnost da korisnik kontroliše proces navodnjavanja putem korisničkog interfejsa, realizovanog na glavnoj kontrolnoj jedinici. Radi jednostavnije realizacije kao i uštede na iskorišćenim portovima, kojih je inače vrlo ograničen broj, pribjeglo se realizaciji korisničkog interfejsa za konfiguraciju sistema pomoću tri tastera. Dva tastera se koriste za kretanje naprijed i nazad kroz opcije u meniju, dok treći taster služi za potvrdu trenutno izabrane opcije (OK taster). Ovi tasteri su na

jednom kraju povezani sa digitalnim pinovima Wasmote platforme preko *pull-down* otpornika, a na drugom kraju su povezani na napon od 3.3V, preuzet sa Wasmote platforme. Kada taster nije pritisnut, odgovarajući pin očitava logičku nulu. Ukoliko je taster pritisnut, očitava se logička jedinica.

Na glavnoj kontrolnoj jedinici se nalaze tri LED koje se koriste kao vizuelni indikatori statusa svakog od ventila. Postavljene su pored displeja i kada je neki od ventila otvoren, odnosno aktivan, odgovarajuća LED svijetli.

Kao što je prethodno naglašeno, sistem je dizajniran da kontroliše tri elektromagnetna ventila za dodavanje vode na proizvodnoj parceli. Da bi se aktivirali, instalirani ventili se moraju napajati sa 24V AC. Iz tog razloga, svaki od tri izlazna signala sa Wasmote platforme se dovode na odgovarajuće kolo za aktivaciju ventila. Pri aktiviranju nekog od ventila, na jednom od tri izlazna porta upisuje se visok logički nivo, pa odgovarajuće kolo za aktivaciju obezbjeđuje 24V AC napajanje odgovarajućem elektromagnetnom ventilu. Na slici 4.8 prikazana je električna šema kola za aktivaciju elektromagnetnih ventila, korišćenog u našoj implementaciji.

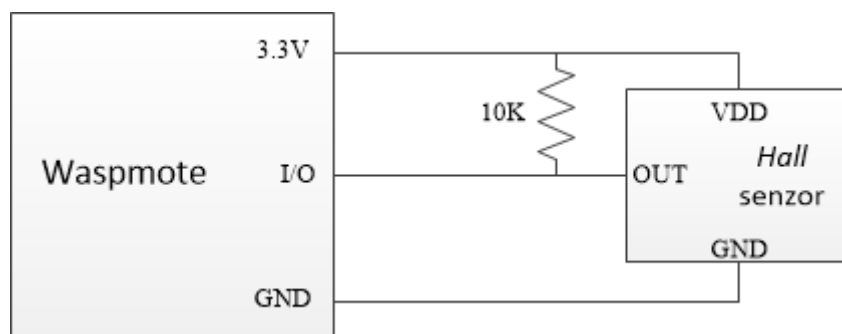


Slika 4.8 Kolo za aktivaciju elektromagnetnih ventila

Kao što se može vidjeti na slici 4.8, za aktivaciju elektromagnetnih ventila koriste se tri identična kola sa opto-trijacima. Oni se nalaze na specijalno dizajniranoj PCB ploči, zajedno sa transformatorom koji 220V pretvara u 24V. Kada korisnik želi da aktivira neki ventil (npr. ventil 1), signal logičke jedinice V_1 stiže na bazu tranzistora. Kada se to desi, tranzistor

propusti signal od 5V koji je doveden na jedan kraj opto-trijaka. Tada, opto-trijak propušta 24V AC signal za napajanje elektromagnetnog ventila.

Za rad sistema neophodno je da se u svakom trenutku može dobiti informacija o količini vode koja je propuštena kroz ventile. Ova informacija je bitna u oba režima rada sistema. Kod automatizovane kontrole navodnjavanja, ukoliko je kao način deaktivacije ventila izabrana zadata količina vode, proces navodnjavanja se zaustavlja kada izmjerena količina vode dostigne vrijednost zadate količine. Kod pametnog režima rada sistema, izmjerena količina vode upoređuje se sa izračunatom normom navodnjavanja. Kada se parceli preda količina vode definisana normom navodnjavanja, proces navodnjavanja se obustavlja sve dok se zemljište ne osuši do granične vrijednosti. Iz tih razloga se u ovoj realizaciji koristi vodomjer koji ima mogućnost digitalnog očitavanja protoka vode. Signal koji predstavlja informaciju o količini vode koja se propusti kroz ventile dobija se sa vodomjera, putem *Hall* senzora. Kolo senzora je *open collector* i napaja se sa 3.3V dovedenih sa Waspote platforme. Izlazni signal sa senzora je povezan sa ulaznim portom platforme uz pomoć *pull-up* otpornika (slika 4.9). To znači da nepobuđeni senzor na izlazu daje visok logički nivo. Kada magnet na odgovarajućoj kazaljki vodomjera prođe ispod senzora, izlazni signal padne na logičku nulu. Dakle, kontrolna jedinica detektuje silaznu ivicu signala, kada se desi cijela rotacija odgovarajuće kazaljke.



Slika 4.9 Povezivanje *Hall* senzora sa Waspote platformom

Na vodomjeru sa odgovarajućim *Hall* senzorom, prikazanom na slici 4.6, nalaze se četiri kazaljke za očitavanje zapreminske količine vode koja prolazi kroz njega. Kazaljke prikazuju protok vode u m^3 na četiri skale, i to: $0.0001m^3$, $0.001m^3$, $0.01m^3$, $0.1m^3$. Na kazaljki koja se koristi za digitalno očitavanje nalazi se magnet, koji prilikom jedne rotacije kazaljke pobuđuje *Hall* senzor. Magnet je moguće postaviti na bilo koju od četiri kazaljke na vodomjeru. Kada se magnet pozicionira, potrebno je postaviti senzor za očitavanje na mjesto očitavanja tj. na odgovarajuću kazaljku. U zavisnosti od pozicije senzora, odnosno od toga koju kazaljku očitava, imamo informaciju koliko litara vode predstavlja svaki impuls signala. Kod vodomjera koji je korišćen za ovu implementaciju, impuls koji signalizira potrošnju određene količine vode može da stiže nakon: 0.1L, 1L, 10L ili 100L propuštene vode. Kada se odredi pozicija senzora i količine vode koju predstavlja jedan impuls signala sa senzora, u programu je potrebno unijeti konstantu koja predstavlja kalibracioni faktor vodomjera. Ova konstanta predstavlja količinu vode u litrima i pri svakoj rotaciji kazaljke množi se sa brojem rotacija.

Ukoliko su senzor i magnet postavljeni za očitavanje kazaljke za mjerenje 10L vode prilikom jedne rotacije, kalibracioni faktor koji treba unijeti iznosi 10. Dakle, svaka rotacija i generisanje jednog impulsa predstavlja 10L vode. U realizaciji prototipa prikazanog u ovom radu, jedan impuls dobijen sa vodomjera predstavlja 10L vode.

Kako jedna rotacija kazaljke vodomjera generiše samo jedan impuls (signal padne sa logičke jedinice na logičku nulu), a ovaj impuls predstavlja prilično veliku količinu vode, veoma je važno detektovati svaku opadajuću ivicu signala. Detektovanje signala sa *Hall* senzora mora biti pouzdano, pa ga je zato potrebno realizovati korišćenjem *interrupt*-a. Na taj način se osigurava da neće doći do propuštanja u detekciji nekog od impulsa. Međutim, raspoloživi pinovi hardverskih *interrupt*-a na Wasmote platformi su već rezervisani i koriste se za rad GSM/GPRS modula. To znači da bi korišćenje hardverskog *interrupt*-a za mjerenje protoka vode, onemogućilo da koristimo GSM/GPRS modul. Pošto je koncepcija rada sistema takva da je korišćenje GSM/GPRS modula neophodno, detekcija signala o potrošnji vode se vrši korišćenjem softverskog *interrupt*-a [39].

Softverski *interrupt* implementiran je korišćenjem odgovarajućeg ugrađenog tajmera/brojača Wasmote platforme. Ovakvo rješenje, drugačije poznato kao tajmerski *interrupt*, omogućava izvršavanje nekog zadatka u precizno definisanim vremenskim intervalima, nezavisno od toga šta se izvršava u glavnom programu. Dakle, možemo odmah prekinuti normalno izvršavanje programa koji se izvršava u *loop()* funkciji u određenom vremenskom intervalu, i izvršiti odgovarajući set komandi. Kada se ove komande izvrše, prekinuti program nastavlja sa izvršavanjem tamo gdje se prekid desio.

Mikrokontroler ATmega1281, na kome se bazira Wasmote platforma, sadrži dva 8-bitna tajmera/brojača i četiri 16-bitna tajmera/brojača. Naime, uz svaki tajmer postoji brojač koji se inkrementira nakon svakog taktnog impulsa tajmera. Na primjer, kod 8-bitnih tajmera/brojača, brojač može da se inkrementira do maksimalne vrijednosti od 256, maksimalnom brzinom koja je definisana frekvencijom mikrokontrolera. Kada se ova vrijednost dostigne, na sljedećem taktnom impulsu brojač se resetuje i počinje iznova da se inkrementira. Za ovu namjenu, koristili smo CTC (eng. *Clear Timer on Compare Match*) tajmerski *interrupt*, koji se ujedno i najčešće koristi. CTC tajmerski *interrupt* se generiše kada brojač tajmera dostigne neku specificiranu vrijednost, smještenu u registru koji služi za ovu namjenu. Kada tajmer/brojač dostigne tu vrijednost, na sljedećem taktu će se resetovati i početi da broji od nule sve dok ponovo ne dostigne istu vrijednost. Frekvencija tajmerskog *interrupt*-a se može definisati tako što podešavamo:

- vrijednost koja se čuva u registru za poređenje sa vrijednošću tajmera/brojača i/ili
- frekvenciju takta tajmera/brojača

Maksimalna frekvencija takta tajmera/brojača, kod mikrokontrolera ATmega1281 je 16 MHz. Koristeći 16-bitni tajmer/brojač, sa maksimalnom vrijednošću koja se može upisati u registar za poređenje (65536), *interrupt* rutina će se izvršavati svake 4 ms. Da bi se povećao

ovaj period, odnosno smanjila učestanost generisanja *interrupt*-a, potrebno je podijeliti tu frekvenciju odgovarajućom vrijednošću koristeći djelitelj frekvencije, tzv. *prescaler*. Njime se kontroliše takt tajmera/brojača prema sljedećoj formuli:

$$f_t = \frac{f_c}{p}$$

gdje je f_t frekvencija tajmera/brojača, f_c frekvencija Wasmote platforme, a p predstavlja *prescaler*. Ovaj djelitelj frekvencije može imati neku od sljedećih vrijednosti: 1, 8, 64, 256 ili 1024. Dakle, moguće je smanjiti frekvenciju takta tajmera/brojača do 1024 puta. Izbor željenog djelitelja frekvencije vrši se podešavanjem odgovarajućih bitova CSn0, CSn1 i CSn2 (eng. *Clock Select Bit*), prikazanih u tabeli 4.1. Slovo n kod naziva bita označava korišćeni tajmer/brojač. U našoj realizaciji korišćen je *timer/counter1*, tako da je $n=1$.

Tabela 4.1 Opis *Clock Select* bitova

CSn2	CSn0	CSn0	Opis
0	0	0	Nema takta (tajmer/brojač stopiran)
0	0	1	$f_c/1$ (bez djelitelja frekvencije, $p = 1$)
0	1	0	$f_c/8$ (djelitelj frekvencije, $p = 8$)
0	1	1	$f_c/64$ (djelitelj frekvencije, $p = 64$)
1	0	0	$f_c/256$ (djelitelj frekvencije, $p = 256$)
1	0	1	$f_c/1024$ (djelitelj frekvencije, $p = 1024$)
1	1	0	Eksterni izvor takta na pinu Tn. Opadajuća ivica
1	1	1	Eksterni izvor takta na pinu Tn. Rastuća ivica

Frekvencija *interrupt* rutine f_i se može izračunati kao:

$$f_i = \frac{f_c}{p * (c + 1)}$$

gdje c predstavlja vrijednost koja se upisuje u registar za poređenje. Da bi se podesila željena frekvencija *interrupt*-a, moramo izračunati vrijednost c kao:

$$c = \frac{f_c}{p * f_i} - 1$$

Vrijednost c mora biti manja od 256, ako se koristi 8-bitni tajmer/brojač, odnosno manja od 65536 za 16-bitni tajmer/brojač.

Kod realizacije našeg sistema za pametno navodnjavanje, i mjerenja količine propuštene vode korišćenjem softverskog *interrupt*-a, korišćen je 16-bitni *timer/counter1*, sa *interrupt* frekvencijom od 4Hz, tj. periodom od 250 ms i *prescaler* vrijednosti 256. Podešavanje 16-bitnog *timer/counter1* korišćenog u ovoj realizaciji vrši se pomoću programskog koda 4.1.

```
noInterrupts(); // Onemogućiti sve interrupt-e
TCCR1A = 0; // Podesiti TCCR1A registar na 0
TCCR1B = 0; // Podesiti TCCR1B registar na 0
TCNT1 = 0; // Inicijalizovati vrijednost brojača na 0
/* Podesiti vrijednost registra za poređenje za frekvenciju 4Hz */
OCR1A = 15624; // (16*10^6)/(4*256) - 1
TCCR1B |= (1 << WGM12); // Uključiti CTC mod
TCCR1B |= (1 << CS12); // Podesiti CS12 bit za 256 prescaler
TIMSK1 |= (1 << OCIE1A); // Omogućiti interrupt poređenja tajmera
interrupts(); // Omogućiti sve interrupt-e
```

Programski kod 4.1 Podešavanje 16-bitnog timer/counter1

Detektovanje silazne ivice signala sa *Hall* senzora u *interrupt* rutini implementirano je programskim kodom 4.2.

```
ISR(TIMER1_COMPA_vect){ //Interrupt rutina
    /* Provjerava se da li je signal sa vodomjera pao na nulu */
    if(digitalRead(VODOMJER) == 0) {
        if(vodomjer_staro == 1) { // Broji se samo jednom po signalu
            br_rotacija++; // Brojač signala se inkrementira
        }
        vodomjer_staro=0;
    }
    else {
        vodomjer_staro=1;
    }
}
```

Programski kod 4.2 Detektovanje silazne ivice signala sa *Hall* senzora u *interrupt* rutini

Prethodnim kodom se ispituje promjena stanja digitalnog pina na koji je zakačen izlazni signal *Hall* senzora. Ukoliko se desi da se na pinu *VODOMJER* detektuje logička nula, provjerava se da li je za dati impuls već detektovan nizak naponski nivo. Ovo je važno da se ne bi desilo više brojanja istog impulsa. Ukoliko impuls logičke nule traje duže od 250ms, odnosno od vremena između dvije *interrupt* rutine, potrebno je utvrditi je li impuls već detektovan. Ovdje je to realizovano pomoću promjenjive *vodomjer_staro*. Ukoliko je vrijednost promjenjive jednaka jedinici, brojač rotacija se inkrementira i promjenjiva se postavlja na nulu. Ona zadržava tu vrijednost sve dok naponski nivo na pinu za detekciju signala sa vodomjera ne bude na logičkoj jedinici, odnosno dok kazaljka na vodomjeru ne otpočne novu rotaciju. Neophodno je obezbijediti da *interrupt* rutina bude što kraća, da se ne bi ometalo izvršavanje glavnog

programa. Ovo je pogotovo važno ukoliko je frekvencija pozivanja *interrupt* rutine velika, odnosno ukoliko se veoma često prekida glavni program.

U funkciji *loop()* glavnog programa, vrijeme internog časovnika se upoređuje sa prethodno konfigurisanim vremenima aktivacije i deaktivacije elektromagnetnih ventila. Isto tako, informacija o količini ispuštene vode upoređuje se sa količinom konfigurisanom od strane korisnika. Kada se izvrši konfiguracija sistema, unijeta vremena se upisuju u matricu, dimenzija $N \times M$. Ova matrica treba da sadrži podatke o trenucima aktivacije/deaktivacije elektromagnetnih ventila. Podaci upisani u matricu upoređuje se sa vremenom internog časovnika glavne kontrolne jedinice i izmjerenom količinom vode koja je propuštena u toku navodnjavanja. Pomenuta matrica sadrži informaciju o:

- rednim brojevima elektromagnetnih ventila,
- vremenskom trenutku aktivacije ventila (za svaki ventil po 5 vremena aktivacije/deaktivacije),
- trajanju navodnjavanja ili zadatoj količini vode koju treba ispustiti i
- indikatoru koji daje informaciju da li je dati ventil podešen ili ne.

N vrste predstavljaju broj elektromagnetnih ventila (u ovom slučaju $N=3$). Kolone $j, j+1, j+2$ predstavljaju vremena aktivacije ventila, trajanje navodnjavanja ili količinu vode koju treba dodati i indikator, respektivno. Izabrano je da svaki od ventila ima do pet vremena aktivacije/deaktivacije, pa je iz tog razloga u ovom slučaju $M=15$. Ovo znači da je moguće konfigurisati maksimalno pet vremenskih intervala za navodnjavanje u toku 24h, na svakom od tri elektromagnetna ventila. U koloni j upisuje se vrijeme aktivacije nekog od ventila. Kada se unese ova informacija, u koloni $j+1$ unosi se vremenski interval trajanja navodnjavanja ili zadata količina vode koju je potrebno dodati. Vrsta podatka u koloni $j+1$ zavisi od toga koji je način deaktivacije elektromagnetnog ventila izabran od strane korisnika. Vrijednost u koloni $j+2$ daje informaciju da li je odgovarajući interval aktivacije podešen ili ne, odnosno da li taj ventil treba aktivirati u zadatom vremenskom intervalu. Ova kolona se postavlja na jedinicu kada se podesi vrijeme aktivacije za dati ventil, a ukoliko vrijeme nije unijeto na odgovarajuću poziciju upisuje se nula. Upoređivanje vremena internog časovnika sistema, konfigurisanih vremena, konfigurisane količine vode i izmjerene količine vode može se prikazati programskim kodom 4.3.

```

FOR every valve
  FOR j=0 to 15; j=j+3 //Kolone za svaki od pet intervala
    IF j+2 == 1 //Provjerava da li je ventil konfigurisan
      IF current_time == matrix[valve,j]
/* Provjerava poklapanje trenutnog vremena i podešenog vremena ventila */
        SWITCH valve //Koji ventil treba aktivirati
          CASE 1 : digitalWrite(Valve1, High)
          CASE 2 : digitalWrite(Valve2, High)
          CASE 3 : digitalWrite(Valve3, High)
        END SWITCH
      END IF
      IF irrigation_type == duration //Tip navodnjavanja
/* Upoređuje trenutno vrijeme sa vremenom aktivacije + trajanje */
        IF current_time == matrix[valve,j] + matrix[valve,j+1]
          SWITCH valve //Koji ventil treba deaktivirati
            CASE 1 : digitalWrite(Valve1, Low)
            CASE 2 : digitalWrite(Valve2, Low)
            CASE 3 : digitalWrite(Valve3, Low)
          END SWITCH
        END IF
      ELSE IF irrigation_type == amount_of_water//Tip navodnjavanja
        IF released_water == matrix[valve,j+1]
/* Provjerava da li je ispuštena količina vode jednaka konfigurisanoj */
          SWITCH valve //Koji ventil treba deaktivirati
            CASE 1 : digitalWrite(Valve1, Low)
            CASE 2 : digitalWrite(Valve2, Low)
            CASE 3 : digitalWrite(Valve3, Low)
          END SWITCH
        END IF
      END IF
    END IF
  END FOR
END FOR

```

Programski kod 4.3 Upoređivanje vremena internog časovnika sistema, konfigurisanih vremena, konfigurisane količine vode i izmjerene količine vode

Prethodnim kodom prikazan je način aktivacije navodnjavanja u automatizovanom režimu rada sistema. Potrebno je da program u svakoj iteraciji *loop()* funkcije ispita da li se neko od vremena aktivacije/deaktivacije ventila poklapa sa vremenom internog časovnika. Prvo se jednom *for* petljom prolazi kroz svaku vrstu, koje predstavljaju tri elektromagnetna ventila. Dalje, za svaku od tri vrste potrebno je novom *for* petljom ispitati kolone matrice. Tako se za prvu vrstu matrice (ventil 1), za prvo vrijeme aktivacije/deaktivacije ventila, provjeravaju prve tri pozicije u kolonama matrice. Prvo se ispituje da li je dato vrijeme (u ovom slučaju prvo vrijeme aktivacije) podešeno. Ukoliko jeste, vrijeme internog časovnika upoređuje se sa podešenim vremenom iz prve kolone matrice. Kada unijeto vrijeme bude jednako vremenu

časovnika, odgovarajući ventil se aktivira. Na isti način se upoređuju preostala četiri vremena aktivacije/deaktivacije prvog ventila, nakon čega se prelazi na preostala dva ventila odnosno na preostale dvije vrste matrice. Istim prolazom kroz petlju, kada se upoređuje vrijeme aktivacije, realizovana je i mogućnost deaktivacije ventila. Ukoliko je korisnik za način deaktivacije ventila izabrao trajanje navodnjavanja, trenutno vrijeme časovnika upoređuje se sa zbirom vremena aktivacije ventila i trajanja navodnjavanja. Dakle, kada se određeni ventil aktivira, program čeka da se zbir vremena aktivacije i unijetog trajanja poklopi sa internim vremenom. Kada se ovo desi, znači da je ventil bio aktivan onoliko koliko je bilo definisano unijetim trajanjem navodnjavanja. Ako korisnik želi da deaktivira ventile na osnovu količine propuštene vode, potrebno je da za svako vrijeme aktivacije ventila unese koliko litara vode želi da propusti prilikom navodnjavanja u tom ciklusu. Nakon aktivacije ventila izmjerena količina vode koja se propušta upoređuje se sa zadatom količinom. Kada nakon određenog vremena ove dvije vrijednosti postanu jednake, dati elektromagnetni ventil se deaktivira i proces navodnjavanja prestaje sve do sljedećeg definisanog vremena aktivacije.

4.1.1 Opis funkcionalnosti sistema za automatizovanu kontrolu procesa navodnjavanja

Prilikom prvog uključivanja i pokretanja sistema potrebno je izvršiti inicijalnu konfiguraciju neophodnu za ispravno funkcionisanje pojedinih elemenata sistema. Prije svih, neophodno je unijeti PIN kod za SIM karticu i konfigurisati vrijeme i datum. Waspote ima ugrađen interni časovnik, RTC (*Real Time Clock*), koji je potrebno inicijalno konfigurisati kako bi kasnije pokazivao tačno vrijeme. Konfigurisanje vremena i datuma se mora ponoviti samo u slučaju potpunog nestanka napajanja Waspote platforme, uključujući i nestanak baterijskog napajanja. Ukoliko je sistem podešen da šalje izvještaj i informacije o konfiguraciji sistema putem SMS-a, mora se unijeti broj telefona na koji će sistem slati odgovarajuće SMS-ove. Kada se jednom unesu, ove informacije se čuvaju u EEPROM-u uređaja, tako da ih više nije potrebno unositi svaki put kada startujemo uređaj. Ukoliko je potrebno, korisnik može promijeniti navedena podešavanja. Takođe, prilikom svakog startovanja uređaja, ukoliko je slanje SMS notifikacije aktivirano, korisniku se šalje poruka sa informacijom da je uređaj uključen i koji put po redu. Ova informacija je korisna naročito u slučajevima čestih prekida u napajanju električnom energijom, kada je potrebno znati da je došlo do prekida rada sistema, kao i da je uređaj ponovo dobio napajanje električnom energijom.

Prilikom prvog uključivanja nakon proizvodnje, uređaj prepoznaje da je potrebno izvršiti inicijalizaciju i podešava sledeće postavke na podrazumijevane vrijednosti:

- Slanje izvještaja putem SMS-a je omogućeno. Izvještaji se šalju na prethodno unijeti broj telefona korisnika. Ova opcija se kasnije može isključiti, kako korisnik ne bi često dobijao SMS poruke ako mu nisu potrebne ili u cilju smanjenja troškova uslijed slanja SMS poruka sa uređaja.

- Slanje kontrolnih podataka na *Livegate* portal je aktivirano. Ova opcija se takođe može deaktivirati u skladu sa potrebama korisnika.
- Kalibracioni faktor vodomjera iznosi 100. Dakle, svaki detektovani impuls sa senzora na vodomjeru množi se sa 100 jer predstavlja 100 litara propuštene vode.
- Vrijednosti u matrici vremena aktivacije/deaktivacije ventila se inicijalizuju na nulu. Time se dozvoljava korisniku da unese nove vremenske intervale i izbjegava mogućnost da se u matrici nalaze neželjene vrijednosti.

Prilikom svakog uključjenja uređaja, na LCD ekranu se ispisuje poruka „Startovanje uređaja“ u trajanju od tri sekunde. Ukoliko se u ovom intervalu pritisne taster „OK“, vrši se reinicijalizacija određenih parametara:

- Aktivira se slanje kontrolnih podataka na *Livegate* portal.
- Brojač startovanja uređaja se postavlja na nulu.
- Ulazi se u glavni meni za podešavanje sistema.

Ukoliko se za vrijeme ispisa poruke „Startovanje uređaja“ pritisne taster „naprijed“ omogućava se unos PIN koda za SIM karticu. Potrebno je unijeti 4 cifre. Izbor cifre se vrši tasterima „naprijed“ i „nazad“, a potvrda se vrši tasterom „OK“.

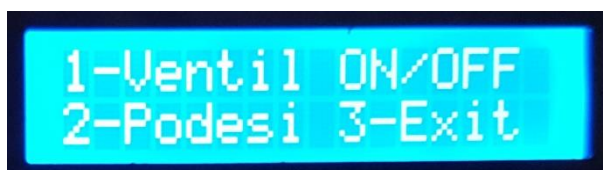
Kada startujemo sistem, na displeju se prikazuje tzv. radni ekran na kome je ispisana informacija o trenutnom vremenu i datumu, kao i informacija o količini ispuštene vode od posljednjeg aktiviranja nekog ventila (slika 4.10). Količina ispuštene vode se uvijek mjeri i prikazuje bez obzira na to koji je način deaktiviranja ventila izabran (trajanje navodnjavanja ili količina vode koju treba propustiti).



Slika 4.10 Izgled radnog ekrana

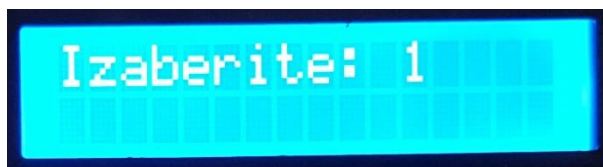
Ukoliko korisnik pritisne taster OK, dok je na glavnoj kontrolnoj jedinici prikazan radni ekran, uređaj ulazi u glavni meni koji je prikazan na slici 4.11. Na displeju se tada prikazuju tri opcije:

- *Ventili ON/OFF* – direktna aktivacija/deaktivacija ventila.
- *Podesi* – konfiguracija sistema.
- *Exit* – izlaz iz menija i prikaz radnog ekrana.



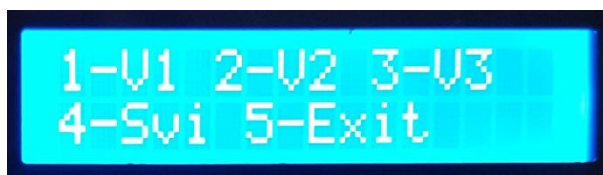
Slika 4.11 Glavni meni

Uređaj ima tri tastera za kretanje kroz meni: taster „nazad“, taster „naprijed“ i taster „OK“. Korisnik pomoću tastera „naprijed“ i „nazad“ bira željenu opciju unutar aktivnog dijela menija dok taster „OK“ služi za potvrdu odabrane opcije. Pritiskom na taster „naprijed“ ili „nazad“ na ekranu se ispisuje broj koji predstavlja neku od opcija iz prethodno prikazanog menija (slika 4.12). Kada se odabere željena opcija, tasterom „OK“ potvrđuje se izbor.



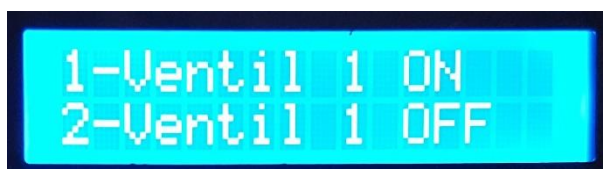
Slika 4.12 Način biranja željene opcije

Opcija *Ventil ON/OFF*, prikazana na glavnom meniju (slika 4.11), je opcija za direktno aktiviranje i deaktiviranje ventila nezavisno od konfigurisanih vremena aktivacije ventila. Ona ima najveći prioritet izvršavanja u glavnom programu. Ukoliko je neki od ventila aktiviran u predefinisanim trenutku (npr. koristeći tajmersko uključivanje), korisnik može direktno deaktivirati dati ventil, ne čekajući da ga uređaj samostalno deaktivira nakon predefinisane trajanja navodnjavanja ili količine vode koju treba propustiti. Kada se odabere opcija *Ventil ON/OFF*, na displeju glavne kontrolne jedinice ispisuje se podmeni za odabir direktne kontrole ventila za navodnjavanje (slika 4.13). Korisnik treba da odabere koji ventil (ili sve njih) želi da aktivira/deaktivira direktno.



Slika 4.13 Podmeni za odabir ventila

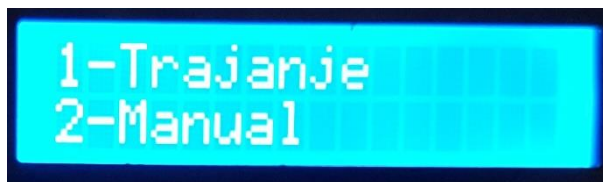
Pritiskom na taster „naprijed“ ili „nazad“, korisnik bira ventil koji želi direktno kontrolisati. Kada se odabere željeni ventil, na primjer ventil 1, na displeju uređaja prikazuje se meni za direktnu aktivaciju/deaktivaciju prvog ventila (slika 4.14). Aktivacija ventila (*Ventil 1 ON*) se može izvršiti na više načina, a ukoliko korisnik odabere opciju deaktivacije ventila (*Ventil 1 OFF*), dolazi do direktnog prekida procesa navodnjavanja na tom ventilu.



Slika 4.14 Upravljanje ventilom 1

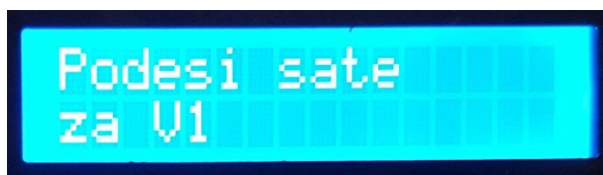
U realizaciji sistema za pametno navodnjavanje implementirana su dva načina direktne aktivacije elektromagnetnih ventila. Prilikom odabira opcije 2 (*Manual*), odabrani ventil se direktno aktivira i zadržava takvo stanje sve do trenutka ponovne deaktivacije na glavnoj

kontrolnoj jedinici. Drugi pristup omogućava da se odabrani ventil direktno aktivira i da ostane aktivan određen vremenski period, koji je potrebno unijeti.

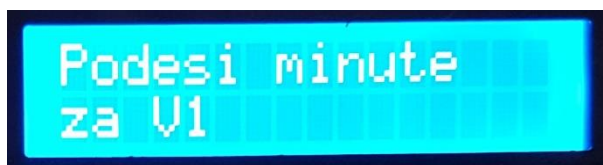


Slika 4.15 Izbor načina direktne aktivacije ventila 1

Kada se kod načina direktne aktivacije ventila odabere opcija 1 (*Trajanje*), korisnik dobija mogućnost unosa vremenskog intervala trajanja procesa navodnjavanja prilikom direktne aktivacije tog ventila. Korisnik prvo treba da unese koliko sati želi da ventil ostane aktivan (slika 4.16) a nakon toga i koliko minuta (slika 4.17). Ova dva unijeta vremena se sabiraju i predstavljaju vremenski interval trajanja navodnjavanja odabranog ventila.



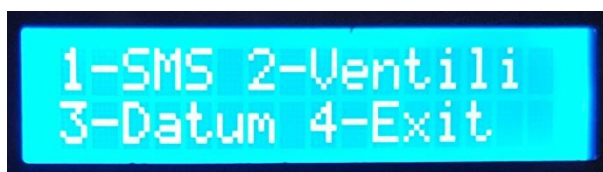
Slika 4.16 Podešavanje koliko sati će ventil 1 ostati aktivan



Slika 4.17 Podešavanje koliko minuta će ventil 1 ostati aktivan

Podešeni vremenski interval trajanja navodnjavanja važi samo jednom. Kada unijeti vremenski interval istekne i dođe do prekida navodnjavanja, zadato vrijeme trajanja navodnjavanja više ne važi. Nakon odabira direktne aktivacije/deaktivacije ventila, glavni program izlazi iz podešavanja i na displeju se ponovo ispisuje radni ekran.

Prilikom konfiguracije sistema na glavnoj kontrolnoj jedinici, odabirom opcije *Podesi* na slici 4.11, otvara se podmeni koji služi za konfigurisanje automatske kontrole navodnjavanja i još nekoliko bitnih funkcija sistema (slika 4.18). Korisnik može da podesi: datum i vrijeme, SMS izvještaj i vremena automatizovane aktivacije/deaktivacije elektromagnetnih ventila.



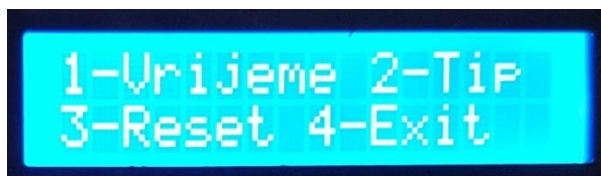
Slika 4.18 Podmeni za podešavanja sistema

Kao što je prethodno rečeno, sistem ima mogućnost slanja SMS notifikacije korisniku u vezi aktivacije/deaktivacije ventila, količini predate vode kao i druge notifikacije vezane za konfiguraciju sistema. Pomoću opcije 1 (SMS), moguće je isključiti ili uključiti slanje SMS izvještaja na korisnički broj telefona. Na primjer, izvještaj statusa nekog od ventila se generiše svaki put kada se ventil aktivira ili deaktivira. Ukoliko je opcija za slanje SMS izvještaja omogućena, sistem šalje izvještaje na prethodno konfigurisani broj telefona korisnika. Izborom opcije SMS otvara se podmeni prikazan na slici 4.19. Ako se sada odabere opcija 1 (SMS poruka ON) vrši se uključivanje SMS izvještavanja, a ako se izabere opcija 2 (SMS poruka OFF) vrši se isključivanje SMS izvještavanja.



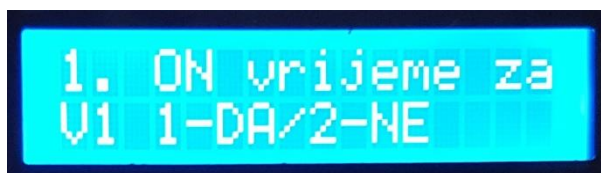
Slika 4.19 Podmeni za uključivanje/isključivanje SMS izvještavanja

Kada korisnik odabere opciju 2 (Ventili), u podmeniju za podešavanje sistema sa slike 4.18, omogućava se konfiguracija kontrole elektromagnetnih ventila, kako je prikazano na slici 4.20. Moguće je konfigurisati tajmer za aktivaciju ventila, odabrati način deaktivacije (tip) navodnjavanja (prema trajanju ili količini vode) i resetovati prethodne konfiguracije tajmera za aktivaciju ventila.



Slika 4.20 Podešavanje elektromagnetnih ventila i tipa navodnjavanja

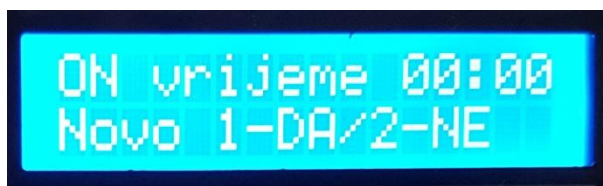
Podešavanje tajmera za aktivaciju elektromagnetnih ventila vrši se opcijom 1 (Vrijeme). Odabirom ove opcije omogućava se konfigurisanje vremenskih intervala aktivacije i deaktivacije elektromagnetnih ventila za navodnjavanje. Korisnik može podesiti do pet vremenskih intervala u toku jednog dana (od 00:00 do 23:59 časova) za svaki od ventila. Na startu konfiguracije, korisnik bira da li želi da podesi prvo vrijeme aktivacije prvog ventila (slika 4.21).



Slika 4.21 Podešavanje prvog vremena aktivacije za ventil 1

Ukoliko odabere opciju 1 (DA), potvrđuje da želi da izvrši ovo podešavanje, a ako odabere opciju 2 (NE), uređaj nudi podešavanje sledećeg ventila. Ukoliko korisnik potvrdi da želi da

podesi prvo vrijeme aktivacije jednog od ventila, ulazi se u proceduru unosa vremenskih intervala. Na slici 4.22 prikazan je ekran za podešavanje vremena aktivacije ventila.



Slika 4.22 Podešavanje vremena aktivacije ventila

Kod ovog podešavanja, uređaj nudi prethodno podešeni vremenski interval za prvo vrijeme aktivacije prvog ventila, koje se čita iz EEPROM-a, (00:00 na slici 4.22) i postavlja upit korisniku da li želi da unese novo vrijeme. Izborom opcije 2 (NE), korisnik ne želi unos novog vremena aktivacije i potvrđuje vrijeme ponuđeno od strane uređaja. Ukoliko korisnik želi podesiti novo vrijeme, potrebno je da odabere opciju 1 (DA).

Novo vrijeme uključivanja se podešava kao i kod direktne aktivacije ventila, unosom željenih sati i minuta (slika 4.16 i slika 4.17). Dakle, korisnik bira u koliko sati i minuta želi aktivirati odabrani ventil. Vremena aktivacije ventila, unijeta od strane korisnika, upisuju se u EEPROM, kako bi bila sačuvana i u slučaju nestanka napajanja.

Kada podesi vrijeme aktivacije, korisnik mora da podesi kada želi da prekine proces navodnjavanja za dati interval. Ovdje, u zavisnosti od izabranog tipa navodnjavanja, korisnik unosi vremenski interval trajanja navodnjavanja ili količinu vode koju želi da preda prilikom navodnjavanja. Nakon izabranog termina aktivacije ventila, ukoliko je režim rada po trajanju, korisnik treba da izabere koliko želi da dati ventil ostane aktivan (slika 4.23). Ovdje uređaj takođe nudi posljednje podešeno trajanje navodnjavanja za taj ventil, pročitano iz EEPROM-a. Na isti način kao i prilikom unosa vremenskog trenutka aktivacije, korisnik unosi novi vremenski interval trajanja navodnjavanja u satima i minutima, ili bira već ponuđeni interval.



Slika 4.23 Podešavanje trajanja aktivacije ventila

Prilikom zadavanja intervala provjerava se da li ima preklapanja između zadatih intervala i već postojećih intervala kod istog ili drugih ventila. Drugim riječima, provjerava da li se unijeto vrijeme aktivacije i trajanja navodnjavanja nekog ventila preklapa sa već unijetim vremenom nekog drugog ventila. Kako je već naglašeno, nije dozvoljena aktivacija više elektromagnetnih ventila u istom trenutku. Iz tog razloga, ukoliko dođe do preklapanja intervala poništava se tekući unos i izlazi iz menija. Kada izvrši prvu konfiguraciju, korisnik može da podesi narednu konfiguraciju za isti ventil ili prvu konfiguraciju za sledeći ventil.

Ukoliko je odabran način deaktivacije ventila preko količine vode (litri), nakon unosa vremena aktivacije nekog od ventila, potrebno je da korisnik unese količinu vode koju želi da propusti na proizvodnu parcelu (slika 4.24 i slika 4.25).



Slika 4.24 Podešavanje količine vode



Slika 4.25 Unos količine vode koju u zadatom terminu treba da propusti odabrani ventil

Pošto se kod ovog režima rada ne može egzaktno utvrditi vremensko trajanje intervala navodnjavanja, ne vrši se provjera preklapanja intervala, već se korisnik mora brinuti o tome da ne zada uključivanje novog ventila prije nego što se isključi prethodni.

Način deaktivacije ventila kod automatizovane kontrole procesa navodnjavanja, kao što je više puta naglašeno, može biti na osnovu vremenskog trajanja ili količine vode. Opcija 2 (*Tip*), kod podešavanja elektromagnetnih ventila na slici 4.20, nudi izbor načina deaktivacije navodnjavanja. Izborom ove opcije dobija se podmeni prikazan na slici 4.26.



Slika 4.26 Izbor načina deaktivacije ventila: prema trajanju ili prema količini propuštene vode

Ukoliko se izabere opcija 1 (*Litri*), deaktivacija ventila će se vršiti nakon što se zadata količina vode (u litrima) propusti prilikom jednog navodnjavanja. Ako se odabere opcija 2 (*Trajanje*), deaktivacija ventila će se vršiti nakon isteka unijetog vremena trajanja navodnjavanja.

Opcija 3 (*Reset*), sa slike 4.20, obavlja resetovanje svih vremenskih intervala aktivacije ventila koji su prethodno bili podešeni, kao i trajanja intervala aktivacije, odnosno količine vode koju treba propustiti. Odabirom ove opcije vrijednosti u matrici vremena aktivacije/deaktivacije ventila resetuju se na nulu.

Podešavanje trenutnog vremena i datuma internog časovnika (RTC), na glavnoj kontrolnoj jedinici, vrši se odabirom opcije 3 (*Datum*) sa slike 4.18. Tačna informacija o tekućem vremenu i datumu su neophodni za pravilno funkcionisanje sistema. Prilikom prvog startovanja uređaja, sistem obezbjeđuje korisniku unos ovih podataka. Nakon inicijalnog

podešavanja, zbog korišćenja baterije na glavnoj kontrolnoj jedinici, nije neophodno dalje podešavanje trenutnog vremena. Međutim, u slučaju odvajanja baterije od Waspote pločice, ovo podešavanje je neophodno opet izvršiti, jer se tada vrijeme i datum resetuju na početne vrijednosti RTC-a. Redom se unose godina, mjesec, dan, sat, minut i sekund. Na ekranu je prikazano koji se podatak očekuje (slika 4.27), a izbor se vrši tasterima „naprijed“ i „nazad“, te potvrđuje tasterom „OK“.



Slika 4.27 Ekran za unos godine prilikom podešavanja časovnika

4.1.2 Konfiguracija sistema putem SMS komandi

Kako bi se omogućio komforniji rad sa sistemom, a ujedno obezbijedila mogućnost njegovog daljinskog konfigurisanja, korisnik ima mogućnost podešavanja sistema putem SMS komandi. Ove komande su specijalno razvijene i kodirane za potrebe ovog sistema. Moguće je konfigurisati vrijeme i datum internog časovnika, trenutke aktivacije ventila, mogućnost slanja SMS notifikacije korisniku, kriterijum deaktivacije ventila, kalibracioni faktor vodomjera i broj telefona na koji se šalju SMS izvještaji. Prvi karakter kodirane poruke određuje željenu komandu, dok ostali karakteri predstavljaju konfiguracione podatke. Svaka SMS komanda, kojom korisnik podešava sistem, završava se tačka-zarez-om.

Prvi karakter kodirane poruke za podešavanje vremena i datuma internog časovnika je 'D'. Nakon toga se unosi zarez, karakter 'V' i razmak. Potom se unosi vrijeme u formatu „čč:mm“ (časovi sa dvije cifre, dvotačka i minuti sa dvije cifre). Kada se unese vrijeme unosi se razmak, karakter 'D' i još jedan razmak. Konačno se unosi datum u formatu dd/mm/gg (dan sa dvije cifre, mjesec sa dvije cifre i godina sa dvije cifre). Podešavanje se završava sa tačka-zarezom. Na primjer, ukoliko se želi podesiti vrijeme na 8:30, a datum na 20. decembar 2016. godine, SMS poruka bi glasila:

D,V 08:30 D 20/12/16;

Nakon izdavanja komandi putem SMS-a, kao i nakon startovanja uređaja i aktiviranja i deaktiviranja ventila, uređaj može korisniku poslati obavještenje o odrađenoj konfiguraciji, na prethodno definisani broj mobilnog telefona. U cilju izbjegavanja troškova za slanje SMS poruka, ovu opciju je moguće isključiti. Isključivanje SMS izvještavanja se vrši porukom:

S,0;

(karakter 'S', potom zarez, cifra 0 i tačka-zarez). Ponovno uključivanje SMS izvještavanja se vrši porukom:

S,1;

(karakter 'S', potom zarez, cifra 1 i tačka-zarez). Inicijalno je SMS izvještavanje uključeno.

Unos broja telefona na koji se šalju SMS izvještaji se vrši porukom: P,+382xxxxxxxx; (karakter 'P', potom zarez, zatim tekst "+382", i broj mobilnog telefona (bez vodeće nule) koji se završava sa tačka-zarezom). Na primjer, ako SMS izvještaji treba da se šalju na broj „06x123456“ poruka bi glasila:

P,+3826x123456;

Ukoliko se želi koristiti opcija SMS izvještavanja, mora se prethodno zadati broj telefona na koji se šalje izvještaj. Broj karaktera predviđen za unos broja telefona je ograničen na 16, uključujući i vodeći karakter '+'.

Podešavanje vremena aktivacije ventila i trajanja navodnjavanja takođe se može vršiti putem komandi poslatih SMS porukom. Jednom SMS porukom se može podesiti jedan ventil, ali se može zadati više intervala aktivacije tog ventila. Prvi karakter u poruci je redni broj ventila koji podešavamo (1, 2 ili 3). Nakon toga se unosi zarez. Treći karakter je broj intervala aktivacije, odnosno koliko puta želimo da aktiviramo dati ventil u toku 24 časa (moguće je podesiti do pet vremena aktivacije za svaki od ventila u toku 24 časa). Četvrti karakter je tačka-zarez. Peti karakter je slovo 'T' nakon čega se unosi razmak. Potom se unosi prvo vrijeme aktivacije ventila, u formatu „čč:mm“ (časovi sa dvije cifre, dvotačka i minuti sa dvije cifre). Onda se unosi razmak, karakter 'D', pa još jedan razmak. Konačno se unosi trajanje navodnjavanja u istom formatu kao vrijeme aktivacije. Podešavanje prvog intervala se završava sa tačka-zarezom. Ukoliko se zadaje više intervala, ponavlja se sekvenca počev od karaktera 'T', zaključno sa tačka-zarez-om. Na primjer, ako se želi podesiti jedan interval aktivacije za ventil 2, gdje navodnjavanje startuje u 08:35, a traje 20 minuta, poruka bi glasila:

2,1;T 08:35 D 00:20;

Ako želimo unijeti više intervala, navede se koliko intervala se zadaje i onda se u istom formatu navedu ti intervali razdvojeni sa tačka-zarezom. Na primjer, ako se želi podesiti četiri intervala za ventil 2, gdje navodnjavanje startuje u 09:13 i traje 2 minuta, onda startuje u 11:17 i traje 2 minuta, zatim startuje u 15:20 i traje 5 minuta i konačno startuje u 18:30 i traje 10 minuta, poruka bi glasila:

2,4;T 09:13 D 00:02;T 11:17 D 00:02;T 15:20 D 00:05;T 18:30 D 00:10;

Inicijalno su sva vremena podešena na nule, odnosno nijedan interval aktivacije ventila nije podešen. Prilikom zadavanja intervala provjerava se da li ima preklapanja između zadatih intervala i već postojećih intervala kod istog ili drugih ventila. Ako se prepozna preklapanje intervala (pošto istovremeno uključivanje više ventila nije dozvoljeno), komanda se poništava, sva vremena za dati ventil se resetuju i (ukoliko je uključeno SMS izvještavanje) šalje se SMS sa porukom da je došlo do preklapanja intervala i da komanda nije prihvaćena. To znači da je neophodno izdati novu komandu u kojoj će biti zadati intervali bez preklapanja.

Ukoliko je kao kriterijum za deaktivaciju ventila podešena količina vode koja se propusti, vrši se zadavanje vremena aktivacije ventila i količine vode koju treba propustiti. Kao i kod trajanja navodnjavanja, i ovdje se jednom SMS porukom može podesiti jedan ventil, ali se može zadati više intervala za navodnjavanje datog ventila. Prvi karakter u poruci je redni broj ventila koji podešavamo (1, 2 ili 3). Nakon toga se unosi zarez. Treći karakter je broj intervala koje želimo da podesimo (1, 2, 3, 4 ili 5). Četvrti karakter je tačka-zarez. Peti karakter je slovo 'T' nakon čega se unosi jedno prazno mjesto. Potom se unosi prvo vrijeme uključjenja u formatu „čč:mm“ (časovi sa dvije cifre, dvotačka i minuti sa dvije cifre). Onda se unosi razmak, karakter 'K', pa još jedan razmak. Na kraju, unosi se količina vode (u litrima) koju treba propustiti prilikom aktivacije željenog ventila. Podešavanje prvog intervala se završava sa tačka-zarezom. Ukoliko se zadaje više intervala, ponavlja se sekvenca počev od 'T' zaključno sa tačka-zarez-om. Na primjer, ako se želi podesiti jedan interval aktivacije za ventil 2, gdje navodnjavanje počinje u 08:35 a propušta se 100 litara vode, poruka bi glasila:

2,1;T 08:35 K 100;

Ako želimo unijeti više intervala, navede se koliko intervala se zadaje i onda se u istom formatu navedu ti intervali razdvojeni sa tačka-zarezom. Na primjer, ako se želi podesiti četiri intervala za ventil 2, gdje navodnjavanje startuje u 09:13 i propušta se 10 litara vode, onda startuje u 11:17 i propušta se 15 litara vode, zatim startuje u 15:20 i propušta se 50 litara vode i konačno startuje u 18:30 i propušta se 1355 litara vode, poruka bi glasila:

2,4;T 09:13 K 10;T 11:17 K 15;T 15:20 K 50;T 18:30 K 1355;

Pošto se kod načina deaktivacije ventila pomoću zadate količine vode ne može egzaktno utvrditi vremensko trajanje intervala navodnjavanja, ne vrši se provjera preklapanja intervala, već korisnik mora voditi računa o tome da ne zada uključivanje novog ventila prije nego što se isključi prethodni.

Zavisno od karakteristika vodomjera, jedan impuls koji vodomjer šalje uređaju može označavati 0.1L, 1L, 10 L ili 100L utrošene vode. Dakle, kalibracioni faktor koji se množi brojem impulsa može biti 0.1, 1, 10 ili 100. Podrazumijevana vrijednost koeficijenta vodomjera je 100. Zadavanje ovog kalibracionog faktora, putem SMS poruke, vrši se na sledeći način. Prvi karakter u poruci je slovo 'V'. Nakon toga se unosi zarez, pa vrijednost koeficijenta. Podešavanje se završava sa tačka-zarezom. Na primjer, ako se želi podesiti da koeficijent bude 10 poruka bi glasila:

V,10;

Način deaktivacije elektromagnetnih ventila, kod automatizovane kontrole procesa navodnjavanja, može se takođe izabrati putem SMS komande. Izbor načina deaktivacije ventila nakon isteka zadatog vremena se vrši porukom:

T,0;

(karakter 'T', potom zarez, cifra 0 i tačka-zarez). Izbor režima u kome se ventili deaktiviraju nakon protoka zadate količine vode vrši se porukom:

T,1;

(karakter 'T', potom zarez, cifra 1 i tačka-zarez). Kada se izvrši promjena režima rada resetuju se podešavanja za trajanje odnosno količinu vode za sve ventile i onemogućeno je njihovo aktiviranje. To znači da je potrebno izvršiti novo podešavanje vremena aktivacije ventila i trajanja odnosno količine vode. Inicijalno je aktivan režim kod koga se ventili isključuju nakon isteka zadatog vremena.

Pojedine informacije o radu uređaja se mogu slati na *cloud*. Kao *cloud* platforma u ovoj implementaciji je izabran *Livegate* portal. Za rad ove opcije potrebno je imati otvoren kanal za prijem podataka od konkretnog uređaja. Prilikom otvaranja kanala generiše se identifikator (tzv. *write key*), koji omogućava upis podataka preko datog kanala. Ovaj identifikator je potrebno programski definisati za dati uređaj. Deaktiviranje slanja podataka na *Livegate* portal se vrši SMS porukom:

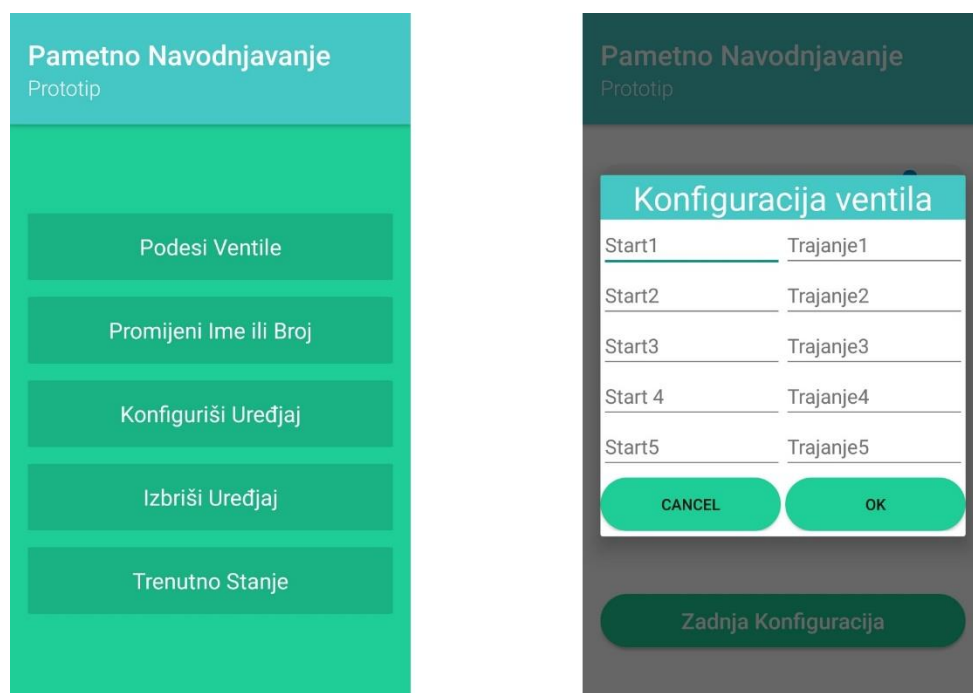
L,0;

(karakter 'L', potom zarez, cifra 0 i tačka-zarez). Ponovno aktiviranje slanja podataka na *Livegate* portal se vrši porukom:

L,1;

(karakter 'L', potom zarez, cifra 1 i tačka-zarez). Slanje podataka na *Livegate* portal je inicijalno uključeno.

Kako bi se obezbijedila mogućnost jednostavnijeg slanja SMS komandi za kontrolu i podešavanje sistema, realizovan je korisnički interfejs u vidu Android aplikacije. Aplikacija je izrađena u okviru specijalističkog rada na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta Crne Gore [40]. Ona omogućava korisniku da na jednostavan način konfiguriše sistem odabirom neke od opcija za podešavanje, dok se kreiranje i slanje odgovarajuće SMS komande vrši u pozadini. Na slici 4.28 prikazan je izgled početnog ekrana Android aplikacije (lijevo) i meni za konfiguraciju vremena aktivacije/deaktivacije elektromagnetnih ventila (desno).



Slika 4.28 Android aplikacija za podešavanje sistema za pametno navodnjavanje

Da bi se omogućilo udaljeno konfigurisanje, sistem treba da bude u stanju da prihvati SMS poruku, provjeri ispravnost kodirane poruke i unese zadate komande u sistem ukoliko je konfiguraciona poruka ispravna. Takođe, bilo je potrebno omogućiti da korisnik dobije povratnu informaciju (SMS notifikaciju) o ispravnosti prihvaćene poruke. Ujedno, ukoliko je unijeta ispravna konfiguraciona poruka, sistem treba da pošalje SMS notifikaciju o tome šta je konfigurisano i koja je nova vrijednost unijeta. Obavješćavanje korisnika u vidu SMS notifikacija nije obavezno, što znači da korisnik ovu opciju može deaktivirati.

Kako bi se obezbijedilo da korisnik u svakom trenutku ima mogućnost konfiguracije putem SMS-a, bilo je potrebno uspostaviti stabilnu GSM/GPRS konekciju, koja će u svakom trenutku biti aktivna. To znači da sistem, odnosno program na glavnoj kontrolnoj jedinici konstantno osluškuje da li je primljena neka konfiguraciona poruka. Kako potrošnja sistema nije bila od presudne važnosti, jer se uređaj napaja iz distributivne mreže, GSM/GPRS modul je uvijek aktivan. Prilikom startovanja sistema, modul se aktivira uključivanjem odgovarajuće biblioteke i pozivom ugrađenih funkcija, čime se inicijalizuje konekcija koja ostaje uvijek otvorena prilikom izvršavanja programa (vidi poglavlje 3.3.1).

U *loop()* funkciji se, pored poređenja konfigurisanih vremena i količine vode sa trenutnim očitavanjem vremena internog časovnika i izmjerene količine vode, provjeravaju dolazne SMS poruke, koje sadrže neku od komandi za konfiguraciju sistema. Provjera dolaznih poruka se vrši programskim kodom 4.4.

```
/* Inkrementira se broj prolaza kroz loop() funkciju */
br_prolaza_kroz_loop++;
/* Upoređivanje broja prolaza sa unaprijed definisanim brojem prolaza */
```

```

if(br_prolaza_kroz_loop > BROJ_PROLAZA) {
    SMS_receive();//Funkcija za prijem poruke
/* Omogućavanje ponovnog brojanja prolaza kroz loop() funkciju */
    br_prolaza_kroz_loop=0;
}

```

Programski kod 4.4 Provjera dolaznih SMS komandi

Kako bi se optimizovao kod, a ujedno obezbijedilo konstantno upoređivanje zadatih vremena za aktivaciju ventila i vremena internog časovnika, bilo je potrebno da se *loop()* funkcija ne prekida često. Dakle, realizovano je da se *loop()* funkcija neprekidno izvršava sve dok korisnik ne želi podesiti nešto na samoj kontrolnoj jedinici. Sa druge strane, bilo je potrebno dozvoliti da se provjera pristiglih poruka odvija neposredno po prijemu ili sa veoma malim zakašnjenjem. Zbog navedenih razloga izabrano je da se provjera prijema poruke ne vrši previše često (prilikom svakog prolaska kroz *loop()*), već nakon prethodno definisanog broja prolaza. U glavnom programu realizovanog sistema, definisano je da je broj prolaza kroz petlju bude jednak 100. Ovo znači da će se prilikom svakog stotog prolaza kroz *loop()* ispitivati da li je stigla neka od konfiguracionih poruka. Kada se ovo desi, poziva se funkcija koja provjerava da li postoji SMS poruka na prijemu. Ukoliko postoji, primljena poruka se prosleđuje funkcijama za provjeru ispravnosti poruke i njeno parsiranje, a ukoliko ne postoji poruka na prijemu *loop()* petlja dalje nastavlja svoje izvršavanje sve dok broj prolaza ponovo ne dostigne predefinisani broj.

Kada se pozove funkcija za ispitivanje prijema SMS poruke, vrši se provjera da li postoji neka nepročitana SMS poruka. Prilikom razvoja ovog dijela sistema bilo je veoma važno znati redni broj pročitane poruke. Kako GSM/GPRS modul SIM900 ima ograničen broj SMS poruka koje može čuvati u svojoj memoriji, bilo je potrebno obezbijediti brisanje konfiguracione poruke nakon obrade i parsiranja. Brisanje poruke vrši se ugrađenom funkcijom, kojoj se kao argument šalje redni broj poruke (indeks). U tu svrhu je prepravljena ugrađena (bibliotečka) funkcija za provjeru prijema poruke, tako da joj se kao argument prosleđuje referenca indeksa primljene poruke. Dio realizovane funkcije *SMS_receive()* za provjeru prijema poruke dat je programskim kodom 4.5.

```

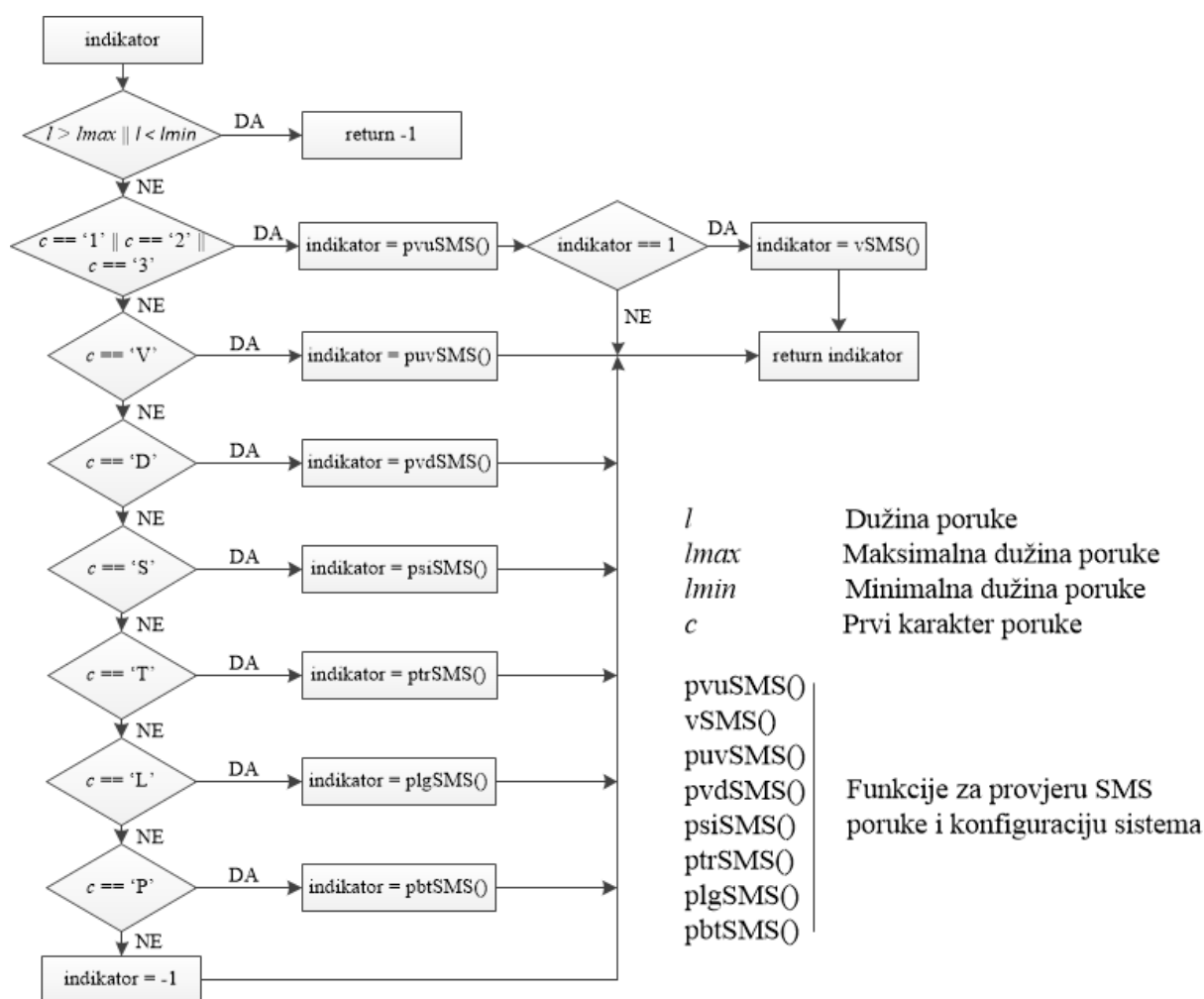
/* Poziv ugrađene funkcije za provjeru prijema */
answer = GPRS_Pro.manageData(&SMS_index);
if(answer == 2) { // Provjera se da li je stigla SMS poruka
    br_primljenih_sms++; // Brojač primljenih SMS poruka
/* Čitanje primljene SMS poruke */
    sprintf(received_sms,"%s",GPRS_Pro.buffer_GPRS);
}
/* Poziv funkcije kojom se vrši provjera ispravnosti komande
i parsiranje */
Indikator_sms = SMS_provjera();

```

Programski kod 4.5 Dio funkcije *SMS_receive()* za provjeru prijema poruke

Ukoliko je konfiguraciona SMS poruka poslata od strane korisnika stigla, funkcija za provjeru prijema ujedno smješta informaciju o indeksu poruke u promjenjivu *SMS_index*, zbog brisanja poruke nakon njene obrade i parsiranja. Kada se poruka pročita, smješta se u globalnu promjenjivu *received_sms*, nakon čega se poziva funkcija *SMS_provjera()*, kojom se provjerava ispravnost primljene komande. U zavisnosti od toga koju vrijednost vrati funkcija za provjeru ispravnosti komande i njeno parsiranje, sistem obavještava korisnika putem SMS notifikacije o tome da li su zadata podešavanja konfigurisana ili je primljena poruka pogrešna i da njeno slanje treba ponoviti.

Dijagram toka funkcije za provjeru vrste komande i poziv odgovarajuće funkcije za provjeru i parsiranje poruke dat je na slici 4.29.



Slika 4.29 Funkcija za provjeru vrste komande i poziv odgovarajuće funkcije za provjeru i parsiranje poruke

Kada se pozove funkcija *SMS_provjera()* (slika 4.29), prvo se provjerava da li je dužina primljene poruke u dozvoljenim granicama. Kako znamo format najkraće i najduže SMS komande koja se može primiti, lako možemo definisati donju i gornju granicu dužine. U slučaju da dužina poruke nije u dozvoljenim granicama funkcija će odmah vratiti vrijednost -1. Ukoliko je dužina SMS-a u dozvoljenim granicama, provjerava se prvi karakter poruke. Ovaj

karakter definiše tip komande, odnosno u zavisnosti od njega pozivaju se odgovarajuće funkcije za dalju provjeru primljene poruke. Ukoliko dođe do bilo kakve greške prilikom dalje provjere poruke, odgovarajuća funkcija za datu komandu će u promjenjivoj *indikator* upisati vrijednost -1. Ako je poruka ispravna, parsiranje poruke i podešavanje sistema će se izvršiti unutar pomenutih funkcija za provjeru. Izuzetak predstavljaju funkcije za provjeru i parsiranje komande podešavanja vremena aktivacije/deaktivacije ventila. Ovdje se provjera poruke i unošenje zadatih vrijednosti vrši odvojeno. Ovo je urađeno da bi se izbjegla mogućnost unosa nepotpunih podataka u matricu vremena aktivacije/deaktivacije ventila. Dakle, prvo se vrši provjera da li je primljena poruka za podešavanje vremena potpuna i ispravna pa tek onda vrši unos vrijednosti u matricu. Ukoliko poruka nije ispravna, funkcija za provjeru će vratiti vrijednost -1, a ukoliko je poruka ispravna poziva se funkcija za parsiranje i unos vremena u matricu. U ovoj funkciji se, osim parsiranja poruke i podešavanja sistema, vrši i provjera preklapanja unijetog intervala trajanja navodnjavanja. Ako bi se desilo da korisnik u jednoj SMS komandi pošalje više od jednog vremena aktivacije/deaktivacije ventila, potrebno je provjeriti da li je došlo do preklapanja intervala. Dakle, potrebno je onemogućiti konfiguraciju ukoliko je novo vrijeme aktivacije nekog od ventila zadato tako da se njegov vremenski interval navodnjavanja preklapa sa prethodnim vremenom, tj. da se ventil želi aktivirati iako navodnjavanje na prethodno definisanom intervalu nije završeno. Ako dođe do preklapanja, funkcija za parsiranje će vratiti vrijednost -2. Na osnovu vrijednosti koju vrati funkcija *SMS_provjera()*, a ukoliko je omogućeno izvještavanje korisnika putem SMS notifikacije, u funkciji *SMS_receive()* se generiše poruka za slanje odgovarajućeg obavještenja korisnika.

Kao što je prethodno rečeno, kada se izvrši provjera primljene komande, njeno parsiranje i konfiguracija željene opcije, potrebno je izbrisati poruku. Brisanje poruke se obavlja unutar funkcije *SMS_receive()*, korišćenjem ugrađene funkcije *GPRS_Pro.deleteSMS()* (programski kod 4.6).

```
for(uint8_t m = 1; m <= SMS_index; m++) {  
    brisanje = GPRS_Pro.deleteSMS(m); // Brisanje SMS poruke  
    delay(10);  
}
```

Programski kod 4.6 Brisanje poruke unutar funkcije *SMS_receive()*

Ugrađena funkcija za brisanje, kao argument koristi redni broj tj. indeks primljene poruke. U ovom slučaju, brisanje se vrši u *for* petlji zbog mogućnosti da se iz nekog razloga data poruka ne obriše. Ukoliko se to desi, prilikom prijema sljedeće poruke redni broj će biti inkrementiran ali će se prilikom prolaska kroz petlju obrisati i prethodna poruka.

4.2 Algoritam za pametno navodnjavanje

Sistem za pametno navodnjavanje je dizajniran tako da samostalno odlučuje o trenucima aktivacije i deaktivacije elektromagnetnih ventila za propuštanje vode na proizvodnoj parceli. Procesom samostalnog donošenja odluka upravlja glavna kontrolna jedinica. Dakle, osim automatizovane kontrole procesa navodnjavanja, na glavnoj kontrolnoj jedinici korisnik može da odabere opciju autonomnog rada sistema. U ovom režimu rada, odgovarajuće odluke o intervalima navodnjavanja vrše se na osnovu dobijenih parametara iz ZigBee bežične senzorske mreže, korišćenjem algoritma za pametno navodnjavanje.

Kod realizacije predloženog sistema, senzorski čvorovi opremljeni su senzorima za mjerenje vlažnosti zemljišta i temperature vazduha, kao i komunikacionim modulom. Kao što je prethodno rečeno, u ovoj implementaciji korišćena je ZigBee bežična senzorska mreža, kao naj pogodnija sa stanovišta male potrošnje kod prenosa skalarnih podataka.

Senzorski čvor za mjerenje vlažnosti zemljišta i temperature vazduha sadrži sljedeće komponente:

- Arduino Uno mikrokontrolersku platformu
- *Irrrometer Watermark 200SS* senzor za mjerenje vlažnosti zemljišta
- DHT11 senzor za mjerenje temperature i vlažnosti vazduha
- Xbee S2 komunikacioni modul

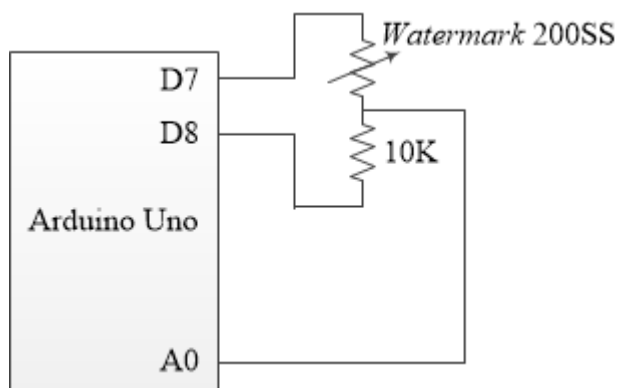
Arduino Uno mikrokontrolerska platforma predstavlja centralni dio senzorskog čvora. Putem nje se vrši komunikacija sa senzorima, obrađuju izmjereni parametri i šalju ka glavnoj kontrolnoj jedinici putem ZigBee bežične senzorske mreže.

Najprije je potrebno izmjeriti parametre od značaja. U ovoj realizaciji, za mjerenje vlažnosti zemljišta korišćen je *Irrrometer Watermark 200SS* senzor (slika 4.30) [41]. Ovaj senzor spada u tip gipsanih senzora za mjerenje potencijala vlažnosti zemljišta, tj. tenzije. Povezan je na 10-bitni analogno digitalni konvertor Arduino platforme, gdje se mjeri izlazni napon na senzoru. Za ispravan rad ovog senzora potrebno je obezbijediti naizmjeničan (AC) izvor napajanja. Ovo je neophodno da ne bi došlo do polarizacije senzora prilikom dugotrajnog izlaganja jednosmjernom (DC) napajanju. DC napajanje senzora dovodi do loših rezultata mjerenja, a ujedno negativno utiče na elektrode u samom senzoru koje gube svoja električna svojstva tokom vremena.



Slika 4.30 Irrometer Watermark 200SS senzor za mjerenje vlažnosti zemljišta

Naizmjeničan izvor napajanja senzora obezbijeđen je putem digitalnih pinova Arduino platforme. Naime, *Watermark* senzor je dio kola, redno vezan sa otpornikom vrijednosti 10K, gdje su na krajevima vezani digitalni pinovi D7 i D8 Arduino Uno platforme (slika 4.31). Promjenom stanja na izlazu ovih pinova obezbjeđuje se četvrtasti naizmjenični signal [42].



Slika 4.31 Blok šema povezivanja Arduino Uno platforme sa *Watermark* 200SS senzorom

U zavisnosti od toga koji je digitalni pin *LOW* (0V) a koji je *HIGH* (5V), korišćenjem formule za naponski djelitelj dobijamo vrijednost otpornosti *Watermark* senzora, R . Nakon izračunavanja otpornosti, za dobijanje vrijednost potencijala vlažnosti zemljišta korišćena je *Shock* –ova jednačina [43]:

$$S = \frac{-3.213 * R - 4.093}{1 - 0.009733 * R - 0.01205 * T}$$

pri čemu je uzeta konstantna temperatura zemljišta $T = 24^{\circ}\text{C}$. Programski kod 4.7 predstavlja očitavanje senzora za mjerenje potencijala vlažnosti zemljišta, kada je na digitalnom pinu D7 upisano stanje logičke nule *LOW* (0V) a na digitalnom pinu D8 upisano stanje logičke jedinice *HIGH* (5V):

```

/* Očitavanje vrijednosti ADC-a na analognom pinu A0 */
sensorValue = analogRead(sensorPin);

/* Pretvaranje vrijednosti sa pina A0 u volte */
sensorVoltage = sensorValue * (5.0 / 1023.0);

/* Izračunavanje otpornosti senzora dobijene preko
naponskog djelitelja */
sensorResistance = (10000.0 * sensorVoltage) / (5.0 - sensorVoltage);

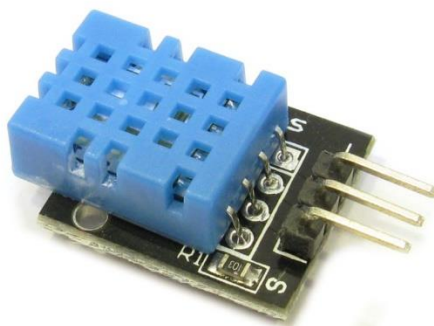
/* pretvaranje otpornosti u KΩ */
sensorResistance = sensorResistance / 1000.0;

/* formula za krivu zavisnosti potencijala vlažnosti zemljišta (KPa) od
otpornosti (KΩ) na konstantnoj temperature zemljišta od 24.0°C */
float S;
S = - 4.093 - (3.213 * sensorResistance);
S = S / (1.0 - (0.009733 * sensorResistance) - (0.01205 * 24.0));

```

Programski kod 4.7 Očitavanje senzora za mjerenje potencijala vlažnosti zemljišta

U realizaciji sistema za pametno navodnjavanje, informacija o temperaturi vazduha koristi se da bi se izbjegla mogućnost rada sistema pri niskim temperaturama. Ukoliko temperatura vazduha padne ispod nule, algoritam onemogućava proces navodnjavanja da ne bi došlo do kvarova u samom sistemu i smrzavanja vode u cijevima za navodnjavanje. Za mjerenje temperature vazduha korišćen je DHT11 senzor, prikazan na slici 4.32. DHT11 senzor temperature i vlažnosti vazduha sastoji se od NTC (eng. *Negative Temperature Coefficient*) termistora za mjerenje temperature i otporničkog tipa mjerenja vlažnosti vazduha. Posjeduje dva pina za napajanje Vcc (5V) i Gnd (0V) i jedan pin za komunikaciju i slanje izmjerenih podataka. Očitavanje izmjerenih vrijednosti sa DHT11 senzora na Arduino platformi vrši se korišćenjem DHT.h biblioteke. Prvo, potrebno je instancirati objekat klase DHT. Zatim, treba omogućiti komunikaciju senzora sa mikrokontrolerom. Nakon toga, pozivom funkcije `readTemperature()` dobijamo vrijednost temperature koju treba poslati glavnoj kontrolnoj jedinici, zajedno sa informacijom o vlažnosti zemljišta.



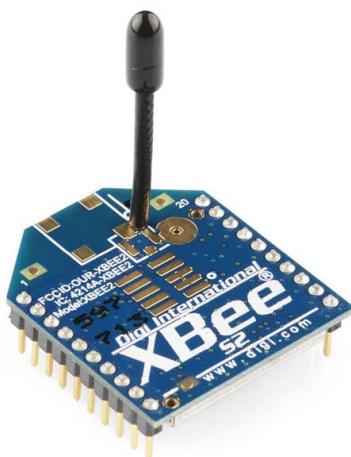
Slika 4.32 DHT11 senzor temperature i vlažnosti vazduha

Programski kod 4.8 prikazuje način komunikacije i očitavanja temperature sa DHT11 senzora.

```
/* Uključivanje biblioteke za komunikaciju sa DHT11 senzorom */  
#include "DHT.h"  
/* Definisanje pina za komunikaciju sa senzorom kao i tip DHT senzora */  
#define DHTPIN 4  
#define DHTTYPE DHT11  
/* Instanciranje objekta klase DHT */  
DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE);  
/* Omogućavanje komunikacije sa senzorom */  
dht.begin();  
/* Očitavanje temperature vazduha */  
float t = dht.readTemperature();
```

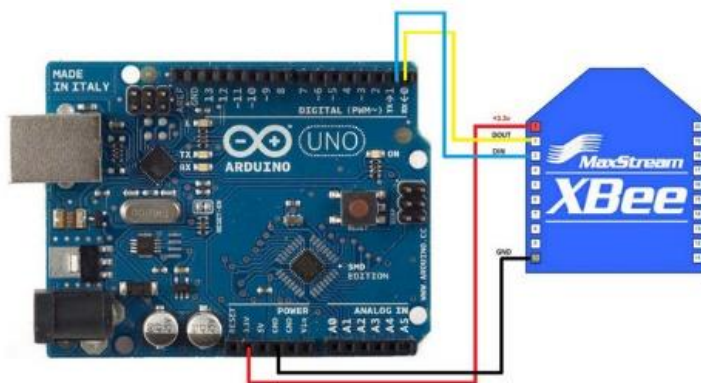
Programski kod 4.8 Način komunikacije i očitavanja temperature sa DHT11 senzora

Kako je prethodno rečeno, komunikacija između senzorskog čvora i glavne kontrolne jedinice vrši se korišćenjem XBee S2 komunikacionih modula (slika 4.33).



Slika 4.33 XBee S2 komunikacioni modul

XBee S2 komunikacioni moduli, uz direktni prenos podataka do koordinatora (topologija zvijezde), pružaju i mogućnost rutiranja paketa, a samim tim i formiranje drugih topologija mreže kao što su stablo i *mesh* (vidi poglavlje 3.2.2). Na senzorskom čvoru, Arduino platforma je povezana sa Xbee S2 komunikacionim modulom putem UART serijskog interfejsa (slika 4.34). Konfiguracija Xbee modula vrši se korišćenjem XCTU softvera, razvijenog od strane DIGI kompanije koja proizvodi XBee komunikacione module [44]. Kod implementacije prikazane u ovom radu, XBee S2 komunikacioni modul na senzorskom čvoru konfigurisan je tako da podatke šalje direktno koordinatoru, u AT (eng. *Transparent*) modu [45]. Ovo znači da se svaki podatak koji Arduino platforma šalje Xbee S2 modulu putem serijskog interfejsa automatski prosleđuje komunikacionim kanalom do koordinatora koji se nalazi na glavnoj kontrolnoj jedinici.



Slika 4.34 Šematski prikaz povezivanja Arduino platforme i Xbee komunikacionog modula [46]

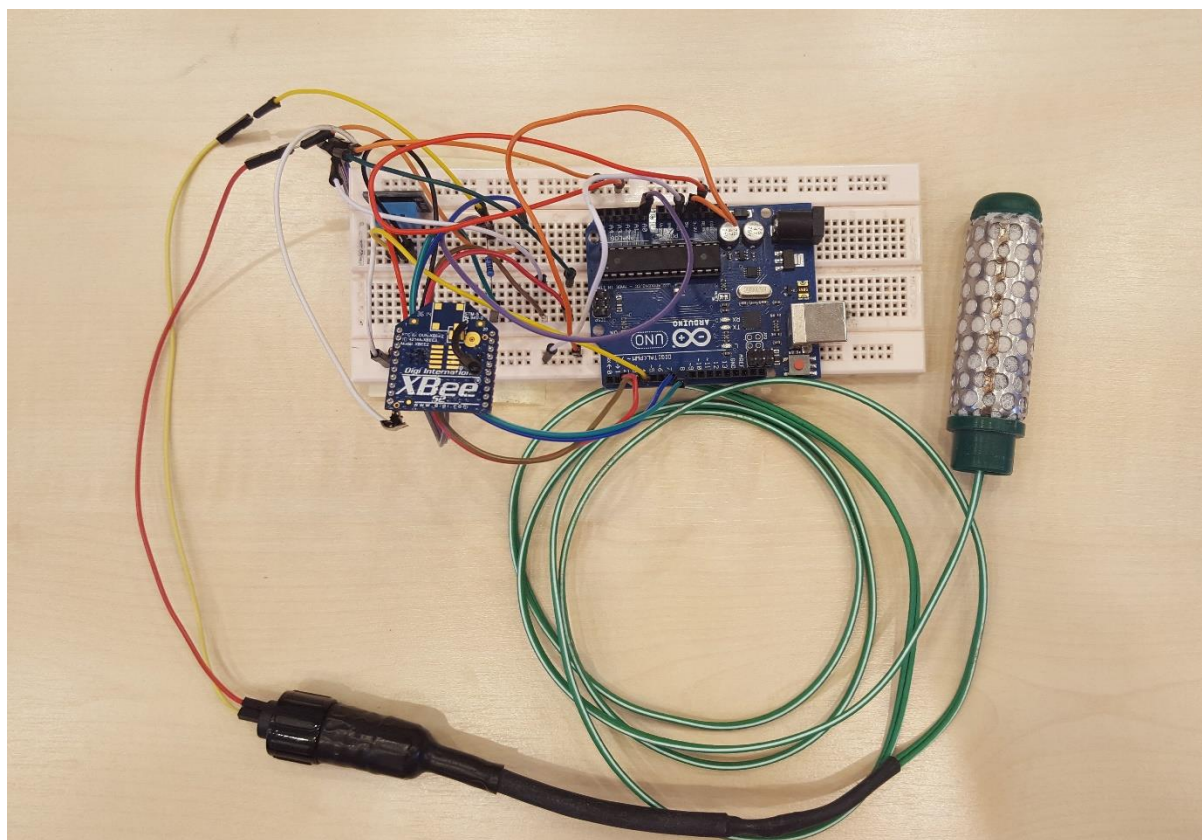
Kao što se može vidjeti na slici 4.34, Xbee S2 modul ima dva pina za napajanje (3.3V i masa) i dva pina za serijsku komunikaciju (Tx i Rx). Kada se parametri dobijeni sa senzora izmjere i obrade, obrazuje se poruka kao niz karaktera, koji sadrži informaciju o vlažnosti zemljišta i temperaturi vazduha. Prvo je potrebno obezbijediti da se serijska komunikacija Arduino platforme sa Xbee S2 modulom odvija istom brzinom protoka podataka. U ovoj implementaciji izabrano je da Xbee S2 moduli budu konfigurisani za brzinu protoka podataka od 9600 baud-a. Dakle, ukoliko je Xbee S2 modul komunicira brzinom od 9600 baud-a, potrebno je definisati istu brzinu kod Arduino serijske komunikacije. Prije formiranja poruke za slanje, bilo je potrebno realizovati funkciju koja će konvertovati informaciju o vlažnosti zemljišta i temperaturi vazduh iz *float* tipa podatka u niz karaktera tj. *string*. Nakon konverzije, formira se poruka za slanje. Ona se dalje prosleđuje Xbee S2 modulu, putem ugrađenog UART porta na digitalnim pinovima D0 (Rx) i D1 (Tx) Arduino Uno platforme. Programski kod 4.9 ilustruje formiranje poruke i njeno slanje na serijski port.

```
/* Definisanje brzine protoka podataka na Arduino serijskom portu */
Serial.begin(9600);
/* Konverzija izmjerenih podataka o vlažnosti zemljišta i temperaturi
vazduha iz float tipa u string */
FloatToString(S, soil_moisture);
FloatToString(T, temperature);
/* Formiranje poruke koju treba poslati glavnoj kontrolnoj jedinici */
sprintf(message,"%s!%s#", soil_moisture, temperature);
/* Slanje poruke Xbee modulu preko ugrađenog UART porta na Arduino
platformi */
Serial.write(message);
```

Programski kod 4.9 Formiranje poruke sa informacijom o vlažnosti zemljišta i temperaturi vazduha i njeno slanje na serijski port

Iz prethodnog koda možemo vidjeti da poruku sa izmjerenim podacima sa senzora čine još karakteri '!' i '#'. Ovo su proizvoljno odabrani karakteri koji služe za lakše parsiranje poruke na strani koordinatora, odnosno na glavnoj kontrolnoj jedinici, koje će biti objašnjeno u nastavku ovog poglavlja. Karakter '!' predstavlja kraj prvog dijela poruke koji nosi informaciju

o izmjerenoj vlažnosti zemljišta, dok karakter '#' predstavlja kraj drugog dijela poruke koji nosi informaciju o izmjerenoj temperaturi vazduha. Prototip senzorskog čvora opremljenog sa sensorima za mjerenje vlažnosti zemljišta i temperature vazduha prikazan je na slici 4.35.



Slika 4.35 Prototip senzorskog čvora za mjerenje vlažnosti zemljišta i temperature vazduha

Na glavnoj kontrolnoj jedinici sistema za pametno navodnjavanje vrši se prijem podataka sa senzorskog čvora. Kako Wasmote platforma posjeduje Xbee socket koji koristi UART0 serijski port, bilo je očekivano da se isti iskoristi u svrhu uspostavljanja komunikacije sa Wasmote platformom. Međutim, pokazalo se da Xbee socket na Wasmote platformi nije predviđen za komunikaciju sa Xbee koordinatorom, već samo sa Xbee krajnjim uređajima. Dakle, Wasmote uređaji su suštinski predviđeni da budu klijentski uređaji, odnosno senzorski čvorovi koji služe za prikupljanje i slanje podataka. Čak i ukoliko bi bilo moguće koristiti ugrađeni Xbee socket, zbog veličine cjelokupnog programskog koda realizovanog na glavnoj kontrolnoj jedinici, korišćenje ugrađenih biblioteka za komunikaciju sa Xbee uređajima ne bi bilo optimalno. Zbog ograničenih resursa samog mikrokontrolera u pogledu slobodnog memorijskog prostora, bilo je potrebno realizovati posebne funkcije za komunikaciju. Ovo je urađeno direktnim korišćenjem UART0 porta Wasmote platforme za komunikaciju sa Xbee modulom.

U realizaciji sistema za pametno navodnjavanje bilo je neophodno implementirati Xbee S2 koordinator bežične senzorske mreže na glavnoj kontrolnoj jedinici. Ovo je važno da bi se izbjeglo korišćenje dodatnog uređaja (*gateway-a*), koji će prikupljati podatke i prosleđivati ih

glavnoj kontrolnoj jedinici. Ideja je da se prijem podataka sa senzorskih čvorova i algoritam za pametno navodnjavanje izvršavaju na istom uređaju. Komunikacija sa Xbee S2 komunikacionim modulom realizovana je putem UART0 serijskog porta, pri čemu nije korišćen cjelokupan Xbee Radio Socket0 već samo pinovi za napajanje (3.3V i masa) i pinovi za serijsku komunikaciju (Tx i Rx). Da bi se omogućilo korišćenje navedenih pinova, realizovana je funkcija *XbeeOn()*, prikazana programskim kodom 4.10.

```
/* Podešavanje izlaza multipleksera UART0 porta na Socket0 */
Utils.setMuxSocket0();
/* Definisanje brzine komunikacije UART0 porta */
beginSerial(9600, UART0);
/* Definisanje izlaznih pinova mikrokontrolera za kontrolu Socket0 */
pinMode(XBEE_PW, OUTPUT);
pinMode(MUX_PW, OUTPUT);
pinMode(MUX_USB_XBEE, OUTPUT);
/* Obezbeđivanje napajanja multipleksera UART0 porta koji kontroliše USB
i Socket0 */
digitalWrite(MUX_PW, HIGH);
digitalWrite(MUX_USB_XBEE, HIGH);
/* Omogućavanje napajanja Xbee modula */
digitalWrite(XBEE_PW, HIGH);
/* Ažuriranje Wasp mote registra */
WaspRegister |= REG_SOCKET0;
/* Oslobađanje UART0 buffer-a */
serialFlush(UART0);
```

Programski kod 4.10 Funkcija XbeeOn()

Navedena funkcija *XbeeOn()*, poziva se u *setup()* funkciji glavnog programa. Nakon poziva ove funkcije moguće je vršiti čitanje UART0 porta, odnosno prijem poruke koju Xbee koordinator mreže dobija od senzorskog čvora.

Prijem i parsiranje poruke dobijene od strane senzorskog čvora, vrši se u *loop()* funkciji glavnog programa posredstvom programskog koda 4.11.

```
/* Provjera zauzetosti UART0 porta */
if (serialAvailable(UART0))
{
    /* Čitanje serijskog porta */
    nod = serialRead(UART0);
    /* Čitanje prvog dijela poruke - vlažnost zemljišta */
    if (ind_wsn == 0)
    {
        /* Upis informacije o vlažnosti zemljišta u string */
        sensor_nod_moisture[a++] = nod;
        /* Provjera da li smo došli do kraja prvog dijela poruke */
        if (nod == '!')
        {
```

```

        /* Upis terminacionog karaktera */
        sensor_nod_moisture[a-1]='\0';
        /* Konverzija iz stringa u float */
        vlaznost_zemljista = string_to_float(sensor_nod_moisture);
        /* Reset brojača za indeksiranje stringa */
        a=0;
        /* Postavljanje indikatora za čitanje drugog dijela poruke */
        ind_wsn=1;
    }
}
/* Čitanje drugog dijela poruke - temperatura vazduha */
else if(ind_wsn==1)
{
    /* Upis informacije o temperaturi vazduha u string */
    sensor_nod_temperature[a++] = nod;
    /* Provjera da li smo došli do kraja drugog dijela poruke */
    if(nod == '#') // kraj poruke
    {
        /* Upis terminacionog karaktera */
        sensor_nod_temperature[a-1]='\0';
        /* Konverzija iz stringa u float */
        temperatura_vazduha= string_to_float(sensor_nod_temperature);
        /* Reset brojača za indeksiranje stringa */
        a=0;
        /* Postavljanje indikatora za čitanje prvog dijela poruke */
        ind_wsn=0;
    }
}
}
}

```

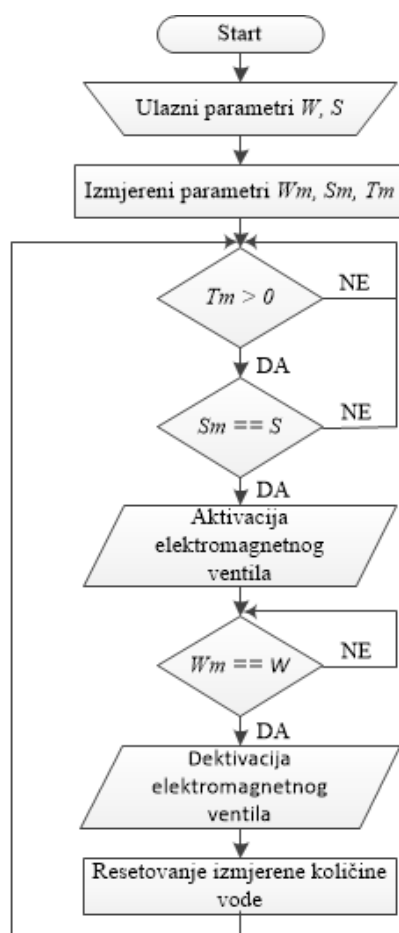
Programski kod 4.11 Prijem i parsiranje poruke dobijene od strane senzorskog čvora

Prethodni kod se izvršava prilikom svakog prolaska kroz *loop()* funkciju glavnog programa. Prvo se provjerava da li je slobodan UART0 serijski port, odnosno da li već postoji neki podatak na ovom portu, da bi se mogao izvršiti prijem poruke. Ukoliko je serijski port slobodan, vrši se njegovo čitanje. Tokom svakog prolaza kroz *loop()* funkciju po jedan bajt poruke se čita i upisuje u odgovarajući string. Prethodno je definisana struktura poruke koju senzorski čvor šalje putem bežične senzorske mreže. Kao što je prethodno rečeno, prvi dio poruke sadrži informaciju o izmjerenoj vlažnosti zemljišta, dok drugi dio poruke sadrži informaciju o temperaturi vazduha. Da bi znali koji dio poruke se parsira u datom trenutku, uveden je indikator *ind_wsn*. Ukoliko je indikator jednak nuli, vrši se čitanje informacije o vlažnosti zemljišta. Kada se dođe do karaktera '!', završava se čitanje prvog dijela poruke i informacija o izmjerenoj vlažnosti zemljišta se konvertuje u *float* tip podatka a ujedno se indikator *ind_wsn* postavlja na jedinicu. Dakle, dalje se vrši čitanje drugog dijela poruke sve dok se ne dođe do kraja, odnosno do karaktera '#'. Nakon toga, informacija o izmjerenoj

temperaturi vazduha se takođe konvertuje iz *string* tipa podatka u *float* i *ind_wsn* se ponovo postavlja na nulu, čime se završava parsiranje poruke dobijene od strane senzorskog čvora.

Nakon prijema i parsiranja poruke na glavnoj kontrolnoj jedinici, izmjereni parametri vlažnosti zemljišta i temperature vazduha se nalaze u odgovarajućim promjenjivima i kao takvi se dalje koriste u algoritmu za pametno navodnjavanje.

Algoritam za pametno navodnjavanje realizovan je na glavnoj kontrolnoj jedinici. Kada se odabere ovaj režim rada sistema, potrebno je unijeti ulazne parametre algoritma. Prvo se mora unijeti optimalna količina vode W , izražena u litrima. Ovaj parametar zavisi od fizičkih karakteristika zemljišta, i izračunava se za proizvodnu parcelu gdje želimo da instaliramo sistem za pametno navodnjavanje. Optimalna količina vode predstavlja normu navodnjavanja i potrebno je izračunati prije instalacije sistema (vidi poglavlje 2.4). Drugi parametar algoritma za pametno navodnjavanje predstavlja graničnu vrijednost potencijala vlažnosti zemljišta S , izražen u KPa. Ovaj parametar ukazuje do koje mjere je dozvoljeno da se dato zemljište osuši, prije nego što se aktivira proces navodnjavanja. Izmjerena količina predate vode tokom jednog procesa navodnjavanja označena je sa W_m , dok je izmjerena tenzija, kao mjera količine vlage u zemljištu označena sa S_m . Dijagram toka algoritma za pametno navodnjavanje prikazan je na slici 4.36.



Slika 4.36 Dijagram toka algoritma za pametno navodnjavanje

Ukoliko je na glavnoj kontrolnoj jedinici izabran autonoman režim rada sistema, tj. režim pametnog navodnjavanja, u funkciji *loop()* se izvršava upoređivanje unijetih parametara algoritma sa izmjerenim vrijednostima. Nakon unosa ulaznih parametara i odabira ventila za navodnjavanje, algoritam prvo provjerava da li je temperatura vazduha T_m veća od nule. Ovo je potrebno da bi se spriječio proces navodnjavanja kada temperatura vazduha padne ispod nule, kako bi se sistem zaštitio od zamrzavanja. Ukoliko je izmjerena temperatura vazduha veća od nule, izmjerena vrijednost potencijala vlažnosti S_m upoređuje se sa graničnom vrijednošću S . Kada izmjerena vrijednost tenzije u zemljištu dostigne vrijednost parametra S , odgovarajući, unaprijed odabrani, elektromagnetni ventil se aktivira i počinje proces navodnjavanja. Aktivacijom ventila, voda prolazi kroz vodomjer sa *Hall* senzorom. Time počinje proces mjerenja količine vode koja se predaje proizvodnoj parceli. Izmjerena količina vode W_m upoređuje se sa unijetom, optimalnom, količinom vode za navodnjavanje W . Kada količina propuštene vode dostigne vrijednost optimalne količine, elektromagnetni ventil se deaktivira i proces navodnjavanja se zaustavlja. Nakon toga, vrijednost izmjerene količine vode se resetuje a vrijednost izmjenog potencijala vlažnosti se ponovo upoređuje sa graničnom vrijednošću. Programski kod 4.12 predstavlja realizaciju algoritma, prikazanog na slici 4.35, u *loop()* funkciji glavnog programa.

```

/* Provjerava se da li je temperatura vazduha iznad nule */
if(temperatura_vazduha > 0){
    /* Provjerava se da li se zemljište osušilo do granične vrijednosti */
    if(vlaznost_zemljista >= granicna_vlaznost){
        /* Provjerava se da li je već aktiviran odabrani ventil */
        /* Ukoliko je indikator jednak nuli aktivira se željeni ventil */
        if(indikator_tip_navodnjavanja_aktivacija == 0){
            /* Aktivacija odabranog ventila */
            switch (ventil){
                case 1 : digitalWrite(VENTIL1,HIGH);
                    br_rotacija=0;
                    indikator_tip_navodnjavanja_aktivacija=1;
                    if(indikator_sms_on == 1){
                        kreiranje_SMS_poruke(1, ventil, norma_navodnjavanja);
                    }
                    break;
                case 2 : digitalWrite(VENTIL2,HIGH);
                    br_rotacija=0;
                    indikator_tip_navodnjavanja_aktivacija=1;
                    if(indikator_sms_on == 1){
                        kreiranje_SMS_poruke(1, ventil, norma_navodnjavanja);
                    }
                    break;
                case 3 : digitalWrite(VENTIL3,HIGH);
                    br_rotacija=0;
                    indikator_tip_navodnjavanja_aktivacija=1;

```

```

        if(indikator_sms_on == 1){
            kreiranje_SMS_poruke(1, ventil, norma_navodnjavanja);
        }
        break;
    }
}
}
/* Provjerava da li je dodata potrebna količina vode */
if (voda() >= norma_navodnjavanja){
    /* Ukoliko je indikator jednak jedinici deaktivira
se željeni ventil */
    if(indikator_tip_navodnjavanja_aktivacija == 1){
        /* Deaktivacija odabranog ventila */
        switch (ventil){
            case 1 : digitalWrite(VENTIL1,LOW);
                    indikator_tip_navodnjavanja_aktivacija=0;
                    if(indikator_sms_on == 1){
                        kreiranje_SMS_poruke(2, ventil, voda());
                    }
                    break;
            case 2 : digitalWrite(VENTIL2,LOW);
                    indikator_tip_navodnjavanja_aktivacija=0;
                    if(indikator_sms_on == 1){
                        kreiranje_SMS_poruke(2, ventil, voda());
                    }
                    break;
            case 3 : digitalWrite(VENTIL3,LOW);
                    indikator_tip_navodnjavanja_aktivacija=0;
                    if(indikator_sms_on == 1){
                        kreiranje_SMS_poruke(2, ventil, voda());
                    }
                    break;
        }
    }
}
}
}
}

```

Programski kod 4.12 Realizacija algoritma za pametno navodnjavanje u loop() funkciji glavnog programa

Sistem za pametno navodnjavanje, zajedno sa bežičnom senzorskom mrežom i senzorskim čvorovima za mjerenje vlažnosti zemljišta, testirani su u laboratorijskim uslovima. Odabrana su tri reprezentativna uzorka zemljišta, sa tri lokacije u Bjelopavličkoj ravnici: ogledno imanje Biotehničkog fakulteta Univerziteta Crne Gore (imanje BTF), imanje kompanije Green house Jovović i Pržine - Pričelje. Uzorci zemljišta sa navedenih lokacija, sa instaliranim senzorima za mjerenje vlažnosti zemljišta prikazani su na slici 4.37.



Slika 4.37 Uzorci zemljišta sa tri lokacije: Pržine – Pričelje (lijevo), Green house Jovović (u sredini) i ogledno imanje Biotehničkog fakulteta (desno)

Za potrebe testiranja rada sistema na ove tri različite vrste zemljišta odabrano je da granična vrijednost vlažnosti, izražena kroz potencijal vlažnosti zemljišta (tenziju), bude 100kPa. Kao što je prethodno rečeno, algoritam za pametno navodnjavanje će aktivirati odgovarajući elektromagnetni ventil kada izmjerena tenzija dostigne unešenu graničnu vrijednost. Zbog različitog mehaničkog sastava zemljišta imaćemo različite vremenske intervale navodnjavanja, jer će se promjena vlažnosti jednog zemljišta vršiti različito od drugog.

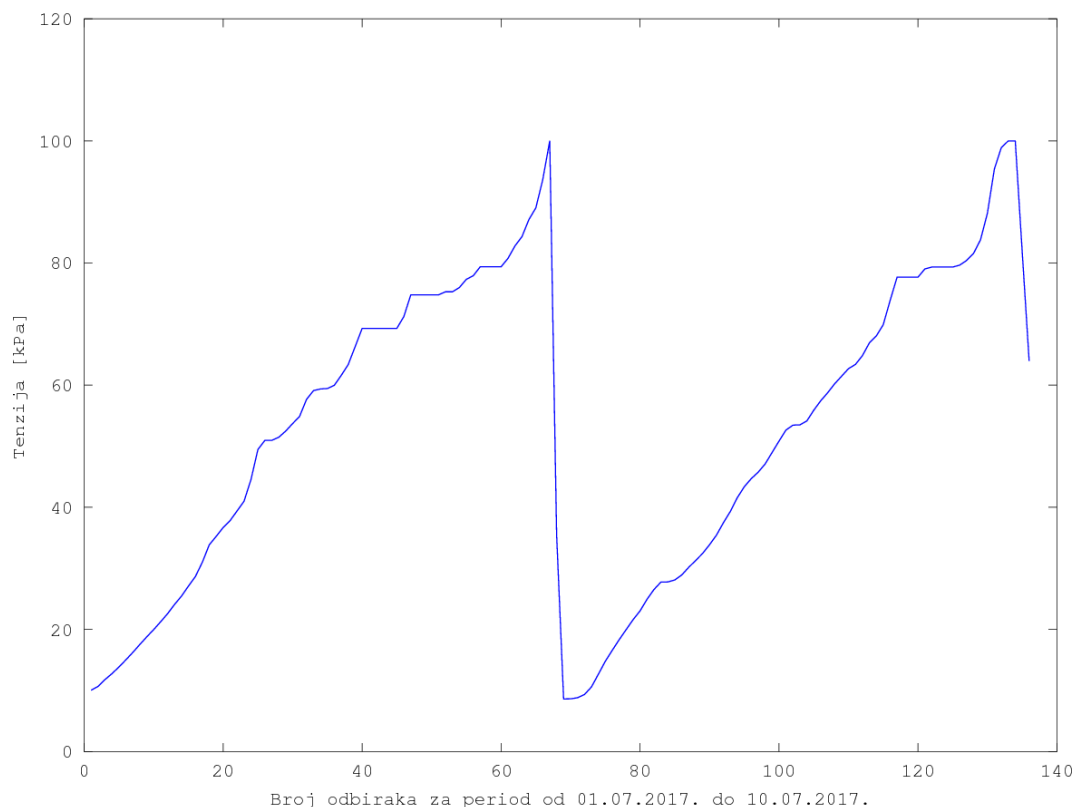
Kao drugi ulazni parametar algoritma za pametno navodnjavanje, potrebno je odrediti optimalnu količinu vode koju treba predati zemljištu (norma navodnjavanja). Za potrebe laboratorijskog testiranja sistema odabrana je blitva, kao reprezentativna kultura. Osim blitve, radi bolje ilustracije, prilikom izračunavanja norme navodnjavanja, razmatrane su još dvije kulture: raštan i vinova loza. Na osnovu mehaničke analize zemljišta, korišćenjem formule za izračunavanje norme navodnjavanja (vidi poglavlje 2.4), izračunate su optimalne količine vode po jedinici površine zemljišta. U tabeli 4.2 prikazane su vrijednosti norme navodnjavanja po m^2 , za prethodno navedene kulture biljaka i vrste zemljišta.

Tabela 4.2 Norme navodnjavanja u zavisnosti od tipa zemljišta i vrste kulture biljke

	Pržine - Pričelje	Green House Jovović	Imanje BTF
Blitva	$26.5dm^3$	$22.9dm^3$	$21.2dm^3$
Raštan	$39.8dm^3$	$34.4dm^3$	$31.8dm^3$
Vinova loza	$119.2dm^3$	$103.2dm^3$	$95.3dm^3$

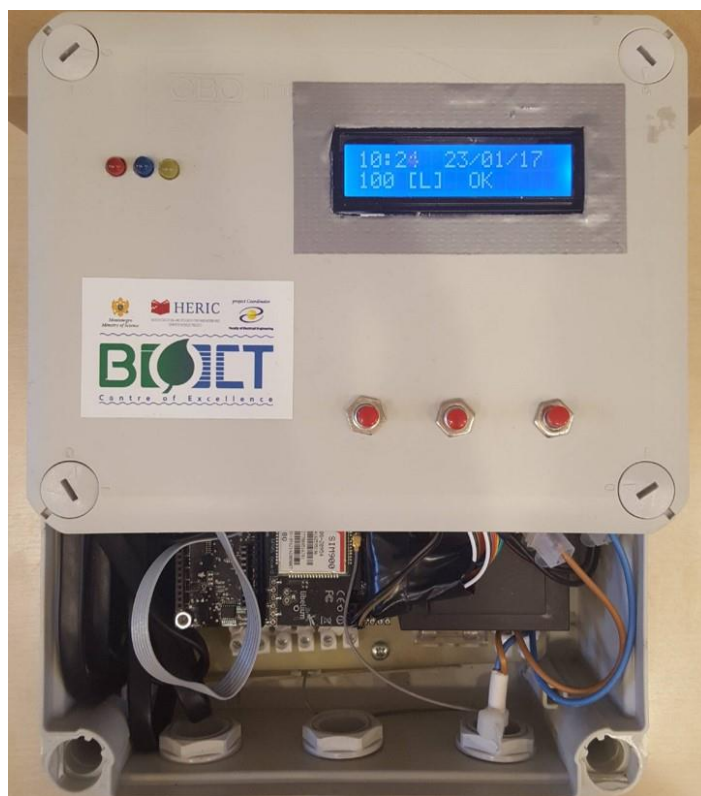
Za jednu vrstu zemljišta, optimalna količina vode se mijenja isključivo u zavisnosti od vrste kulture koja se gaji, odnosno od dubine korjenovog sistema biljke. U tom smislu imamo različite dubine korjenovog sistema za različite vrste biljke (blitva 20cm, raštan 30cm, vinova loza 90cm). Dakle, ukoliko bi za istu vrstu zemljišta umjesto blitve posmatrali vinovu lozu, potrebna optimalna količina vode bi se drastično promijenila, što se jasno može vidjeti u tabeli 4.2.

Kako bi precizno i pouzdano ispitali funkcionisanje sistema, a ujedno pratili promjenu vlažnosti zemljišta, izvršeno je slanje izmjerenih podataka na *LiveGate* platformu. Kao što je ranije rečeno, pri ovom ispitivanju kod sve tri vrste zemljišta odabrana je blitva kao posmatrana kultura. U ovom slučaju, analizirana je promjena vlažnosti zemljišta i trenuci aktivacije navodnjavanja na jednom od tri navedena uzorka zemljišta: sa imanja BTF. Na slici 4.38 prikazana je promjena tenzije (vlažnosti zemljišta) u periodu od 01.07.2017. do 10.07.2017.

**Slika 4.38** Grafik promjene tenzije (vlažnosti zemljišta) u periodu od 01.07.2017. do 10.07.2017.

Prilikom inicijalizacije sistema za pametno navodnjavanje, unijeta je granična vrijednost vlažnosti zemljišta i izračunata norma navodnjavanja. Na grafiku sa slike 4.38 mogu se jasno uočiti trenuci aktivacije sistema za navodnjavanje. U početku, zemljištu je dodata optimalna količina vode, koja u tabeli 4.2 iznosi $21.2 \frac{dm^3}{m^2}$. Nakon završetka procesa navodnjavanja, zemljište se suši, procenat vlage se smanjuje, odnosno povećava se tenzija. Kada tenzija dostigne 100kPa, aktivira se proces navodnjavanja i ponovo se zemljištu predaje zadata optimalna količina vode. Kada sistem izmjeri, očitavanjem vodomjera, da je predata zadata količina vode, deaktiviraju se ventili i prekida se navodnjavanje. Nakon toga se proces iterativno ponavlja, kao što se može vidjeti na istom grafiku.

Prototip sistema za pametno navodnjavanje (slika 4.39) instaliran je, razvijan i testiran na oglednoj proizvodnoj parceli u plasteniku kompanije Green house Jovović (slika 4.40), koja je partner na prvom Centru izvrsnosti u Crnoj Gori, Centru izvrsnosti u bioinformatici (BIO-ICT). Ideja za razvoj jednog ovakvog sistema je upravo nastala u okviru BIO-ICT centra, koji je omogućio multidisciplinarni pristup istraživanju u ovoj oblasti i obezbijedio opremu i materijal za implementaciju sistema. Automatizovana kontrola procesa navodnjavanja obezbijedila je vlasniku plastenika uštedu u smislu ljudskih resursa i utrošenog vremena na oglednoj parceli. Pokazalo se da sistem ima visok stepen pouzdanosti kao i robusnost, što je omogućilo nesmetani višemjesečni rad sistema u realnim uslovima.



Slika 4.39 Glavna kontrolna jedinica sistema za pametno navodnjavanje



Slika 4.40 Sistem za pametno navodnjavanje instaliran na oglednoj proizvodnoj parceli

5 Zaključak

U ovom magistarskom radu predloženo je jedno moguće rješenje sistema za tzv. pametno navodnjavanje poljoprivrednih proizvodnih parcela. Kroz multidisciplinarni pristup, povezujući istraživanja u oblasti biotehnike (sa posebnim osvrtom na melioracije) i informaciono-komunikacionih tehnologija, razvijeno je rješenje koje može autonomno, bez intervencije korisnika, da obavlja optimalno navodnjavanje, u skladu sa potrebama biljke. Predloženi sistem podržava dva režima rada: režim automatizovane kontrole procesa navodnjavanja i autonoman (pametn) režim rada. Automatizovana kontrola procesa navodnjavanja omogućava jednostavan i pouzdan proces konfiguracije sistema, kako bi korisnik lako mogao da preuzme (trenutno ili u određenom periodu) kontrolu nad sistemom. Kod pametnog režima rada sistema, navodnjavanje zemljišta se vrši bez intervencije korisnika, na osnovu ulaznih parametara pomoću kojih se određuju optimalni periodi za navodnjavanje. Prethodno je potrebno izvršiti konfiguraciju sistema tako što se na osnovu laboratorijskih analiza zemljišta izračuna norma navodnjavanja i odredi granična vrijednost vlažnosti zemljišta pri kojoj se započinje navodnjavanje. Tokom rada sistema u autonomnom režimu ovi se parametri upoređuju sa podacima dobijenim sa proizvodne parcele putem bežične senzorske mreže, na osnovu čega se donose adekvatne odluke. Na taj način je omogućen samostalan rad sistema, koji na osnovu izmjerenih podataka obezbjeđuje proces tzv. pametnog navodnjavanja.

Kako bi se obezbijedila akvizicija neophodnih podataka za pravilan rad sistema, realizovan je senzorski čvor za mjerenje vlažnosti zemljišta i temperature vazduha. U okviru ovog senzorskog čvora vrši se transformacija podataka iz oblika koji se dobija elektronskim senzorima, u oblik koji je pogodan za analizu od strane stručnjaka u oblasti melioracija. U ovu svrhu su korišćeni odgovarajući matematički modeli. Da bi se obezbijedio brz i pouzdan prenos izmjerenih podataka, uz malu potrošnju električne energije, koristi se bežična senzorska mreža (WSN). Koristeći WSN tehnologiju, podaci o posmatranim ambijentalnim parametrima se prenose sa udaljenih senzorskih čvorova prema glavnoj kontrolnoj jedinici gdje se vrši obrada pristiglih podataka. Osim prijema i obrade podataka sa senzorskih čvorova, glavna kontrolna jedinica mora vršiti pouzdano mjerenje količine vode koja se predaje proizvodnoj parceli prilikom navodnjavanja. Da bi se to postiglo mjerenje se vrši korišćenjem softverskog *interrupt*-a. Konačno, na glavnoj kontrolnoj jedinici implementiran je algoritam za pametno navodnjavanje koji, na osnovu podataka dobijenih sa senzora, ulaznih parametara dobijenih uzorkovanjem i laboratorijskom analizom zemljišta i u zavisnosti od vrste kulture koja se uzgaja, donosi odluke o trenutku započinjanja i završavanja procesa navodnjavanja.

Sistem za navodnjavanje koji je predložen u ovom radu omogućava i režim rada u kome korisnik preuzima kontrolu nad sistemom. U ovom režimu rada omogućeno je zadavanje vremenskih trenutaka u kojima otpočinje navodnjavanje, dok se proces navodnjavanja završava na osnovu odabira jednog od dva kriterijuma: vremenskog trajanja navodnjavanja ili

predate količine vode. Obezbijeđeno je da se upravljanje i konfiguracija rada sistema može vršiti na samom sistemu (putem tastera na glavnoj kontrolnoj jedinici) ili sa udaljene lokacije korišćenjem SMS komandi, specijalno dizajniranih u ovu svrhu. Za potrebe smještanja, vizuelizacije i obrade podataka od važnosti, na osnovu kojih se kasnije može vršiti analiza i unapređenje sistema, omogućeno je slanje parametara na *cloud* platformu *LiveGate* [20].

Prototip sistema za pametno navodnjavanje instaliran je na oglednoj poljoprivrednoj parceli u plasteniku kompanije Green house Jovović u opštini Danilovgrad, gdje se u višemjesečnom radu pokazao kao funkcionalan i pouzdan u realnim radnim uslovima. Predloženi sistem stoga nalazi važnu primjenu u agrikulturi, kod uzgajanja različitih kultura biljaka, na različitim tipovima zemljišta, povećavajući prinos i kvalitet uz optimalnu potrošnju vode.

Sistem ovakvog tipa uvijek daje prostora za dalje unapređenje i poboljšanje. Buduće istraživanje biće usmjereno ka analizi podataka o periodima navodnjavanja i vlažnosti zemljišta koji se šalju na udaljeni server, sa ciljem unapređenja algoritma za pametno navodnjavanje. Takođe, planirano je unapređenje senzorskog čvora koji neće koristiti mikrokontrolersku platformu za obradu i pripremu za slanje podataka sa senzora. Ovakav senzorski čvor će sadržati samo komunikacioni modul i senzore za mjerenje potrebnih parametara. Planirana je implementacija komunikacionog modula koji ima mogućnost određenog procesiranja podataka, nakon čega će se podaci dalje slati ka glavnoj kontrolnoj jedinici sistema na finalnu obradu. Ovo će omogućiti optimizaciju potrošnje električne energije i povećanje vremena autonomije senzorskog čvora, a ujedno usloviti smanjenje cijene samog sistema.

6 Literatura

- [1] Karimov, Akmal, et al. "A water accounting procedure to determine the water savings potential of the Fergana Valley." *Agricultural water management* 108 (2012): 61-72.
- [2] Pimentel, David, et al. "Water resources: agricultural and environmental issues." *BioScience* 54.10 (2004): 909-918.
- [3] Blackshaw, Robert E. "Influence of soil temperature, soil moisture, and seed burial depth on the emergence of round-leaved mallow (*Malva pusilla*)." *Weed Science* (1990): 518-521.
- [4] FAO. 2011. The state of the world's land and water resources for food and agriculture (SOLAW) – Managing systems at risk. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome and Earthscan, London.
- [5] Rockström, Johan, et al. "Managing water in rainfed agriculture - The need for a paradigm shift." *Agricultural Water Management* 97.4 (2010): 543-550.
- [6] D. Hillel, „Introduction to environmental soil physics“, Academic press, 2003.
- [7] H. Resulović, H. Čustović, „Pedologija Opći dio“, Knjiga I, Univerzitet u Sarajevu, Šumarski fakultet, Sarajevo, (2002)
- [8] “Soils - Part 2: Physical Properties of Soil and Soil Water,” <http://passel.unl.edu> [Online]. Dostupno na: <http://passel.unl.edu/pages/informationmodule.php?idinformationmodule=1130447039&topicorder=4&maxto=10> [Posjećeno: 11.10.2016.]
- [9] Donahue, R. L., R. W. Miller, and J. C. Shickluna. "An introduction to soils and plant growth 4 th ed." (1977). pp. 62-63
- [10] Avakumović, D., et al. "Savremena analiza potrebnih količina vode za navodnjavanje." *Vodoprivreda* (2005): 0350-0519.
- [11] M. Knežević, „Planiranje i projektovanje sistema za odvodnjavanje i navodnjavanje u Bjelopavličkoj ravnici“ Doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu, Poljoprivredni fakultet, Beograd, (2008)
- [12] Pereira, L.S., Allen R.G., 1999. Crop water requirements. Chapter 5.1 of CIGR Handbook of Agricultural Engineering, Vol I: Land and Water Engineering, ASAE, St. Joseph, MI: 213-262
- [13] Martin, D. L., Stegman, E.C., and Fereres, E., 1990. Irrigation scheduling principles. *Management of Farm Irrigation systems*, eds. Hoffman, G.J., et al., pp. 155-203
- [14] “Chapter 1 - Introduction to evapotranspiration,” <http://www.fao.org> [Online]. Dostupno na: <http://www.fao.org/docrep/x0490e/x0490e04.htm> [Posjećeno: 20.10.2016.]
- [15] Allen, R.G., L.S.Pereira, D. Raes, and M. Smith. 1998. “Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements.” *Irrigation and Drainage Paper No. 56*, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy.

- [16] "Chapter 6 – Drainage" <http://www.fao.org> [Online]. Dostupno na: <http://www.fao.org/docrep/r4082e/r4082e07.htm> [Posjećeno: 20.10.2016.]
- [17] "Sensor technology," <http://mea.com.au> [Online]. Dostupno na: <http://mea.com.au/soil-plants-climate/soil-moisture-monitoring/learning-centre/sensor-technology> [Posjećeno: 04.06.2016.]
- [18] Rudić D., (1999) Melioracije , Univerzitet u Beogradu, Poljoprivredni fakultet, Beograd-Zemun
- [19] Dugalić, G., Gajić, B., (2005) „Pedologija praktikum”, Čačak
- [20] "LiveGate," <http://livegate.ac.me/> [Online]. Dostupno na: <http://livegate.ac.me/> [Posjećeno: 12.02.2017.]
- [21] Ernst, Rolf, Jörg Henkel, and Thomas Benner. "Hardware-software cosynthesis for microcontrollers." IEEE Design & Test of computers 10.4 (1993): 64-75.
- [22] Gridling, Gunther, and Bettina Weiss. "Introduction to microcontrollers." Vienna University of Technology Institute of Computer Engineering Embedded Computing Systems Group (2007).
- [23] "Arduino," <https://www.arduino.cc> [Online]. Dostupno na: <https://www.arduino.cc> [Posjećeno: 02.04.2017.]
- [24] "Arduino Language Reference," <https://www.arduino.cc> [Online]. Dostupno na: <https://www.arduino.cc/en/reference/homePage> [Posjećeno: 02.04.2017.]
- [25] "Raspberry Pi" <https://www.raspberrypi.org> [Online]. Dostupno na: <https://www.raspberrypi.org> [Posjećeno: 12.04.2017.]
- [26] "BeagleBone" <http://beagleboard.org> [Online]. Dostupno na: <http://beagleboard.org> [Posjećeno: 12.04.2017.]
- [27] "FT232R datasheet," <http://www.ftdichip.com> [Online]. Dostupno na: http://www.ftdichip.com/Support/Documents/DataSheets/ICs/DS_FT232R.pdf [Posjećeno: 17.04.2017.]
- [28] Baronti, Paolo, et al. "Wireless sensor networks: A survey on the state of the art and the 802.15. 4 and ZigBee standards." Computer communications 30.7 (2007): 1655-1695.
- [29] Akyildiz, Ian F., et al. "Wireless sensor networks: a survey." Computer networks 38.4 (2002): 393-422.
- [30] Ojha, Tamoghna, Sudip Misra, and Narendra Singh Raghuwanshi. "Wireless sensor networks for agriculture: The state-of-the-art in practice and future challenges." Computers and Electronics in Agriculture 118 (2015): 66-84.
- [31] B. Sibbald, Use computerized systems to cut adverse drug events: report, CMAJ: Canadian Medical Association Journal 164 (13) (2001) 1878, 1/2p, 1c.
- [32] "Alert Users Group," <http://www.alertsystems.org> [Online]. Dostupno na: <http://www.alertsystems.org> [Posjećeno: 10.02.2017.]
- [33] Kemal Akkaya and Mohamed Younis. A survey on routing protocols for wireless sensor networks. Ad Hoc Networks, 3(3):325 – 349, 2005. ISSN 1570-8705.

- [34] Perkins, Charles, Elizabeth Belding-Royer, and Samir Das. Ad hoc on-demand distance vector (AODV) routing. No. RFC 3561. 2003.
- [35] "SimCom," <http://simcomm2m.com/En/> [Online]. Dostupno na: <http://simcomm2m.com/En/> [Posjećeno: 05.02.2017.]
- [36] "ARM926EJ-S datasheet," <http://www.microchip.com> [Online]. Dostupno na: http://www.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/ARM_926EJS_TRM.pdf [Posjećeno: 26.02.2017.]
- [37] "Waspote GSM/GPRS datasheet," <http://www.libelium.com> [Online]. Dostupno na: http://www.libelium.com/downloads/documentation/waspote_gsm_gprs_pro_networking_guide.pdf [Posjećeno: 05.02.2017.]
- [38] Savić T., Radonjić M., "Proposal of Solution for Automated Irrigation System", Proc. of 24th Telecommunication Forum TELFOR 2016, Belgrade, Serbia, November 2016.
- [39] Savić T., Bajagić B., Knežević M., Radonjić M., "Method for Measuring Released Amount of Water in Smart Irrigation System", Proc. 22nd Conference on Information Technologies IT 17, pp. 161 - 164, Žabljak, Montenegro, February 2017.
- [40] Vujošević L., "Android aplikacija za podršku automatizovanom navodnjavanju", Specijalistički rad, Univerzitet Crne Gore, Elektrotehnički fakultet, Podgorica (2016)
- [41] "200SS Watermark datasheet," <http://www.irrometer.com> [Online]. Dostupno na: <http://www.irrometer.com/pdf/sensors/403%20WATERMARK%20Sensor-WEB.pdf> [Posjećeno: 16.05.2017.]
- [42] Radman V., "Mikroprocesorski sistem za mjerenje vlažnosti zemljišta", Specijalistički rad, Univerzitet Crne Gore, Elektrotehnički fakultet, Podgorica (2016)
- [43] Shock, C.C., J.M. Barnum, and M. Seddigh. 1998. Calibration of Watermark soil moisture sensors for irrigation management. Proceedings of the 1998 Annual Meeting of the Irrigation Association. p. 139-146.
- [44] "XCTU," <https://www.digi.com> [Online]. Dostupno na: <https://www.digi.com/products/xbee-rf-solutions/xctu-software/xctu> [Posjećeno: 16.06.2017.]
- [45] Faludi, Robert. Building wireless sensor networks: with ZigBee, XBee, arduino, and processing. " O'Reilly Media, Inc.", 2010.
- [46] Hanafi, Dirman, et al. "Simple GUI wireless controller of quadcopter." International Journal of Communications, Network and System Sciences 6.1 (2013): 52.