

Određivanje pozicije korisnika za optimalniju podzemnu navigaciju pri spašavanju primjenom SGS-a

Weiser, Karlo

Master's thesis / Diplomski rad

2021

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:169:574067>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-19**



Repository / Repozitorij:

[Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering Repository, University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET
Diplomski studij rudarstva

**ODREĐIVANJE POZICIJE KORISNIKA ZA OPTIMALNIJU PODZEMNU
NAVIGACIJU PRI SPAŠAVANJU PRIMJENOM SGS-A**

Diplomski rad

Karlo Weiser
R-236

Zagreb, 2021.



KLASA: 602-04/21-01/1
URBROJ: 251-70-03-21-2
U Zagrebu, 08.02.2021.

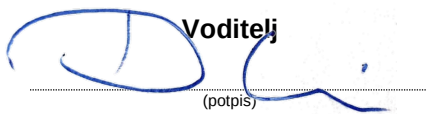
Karlo Weiser, student

RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju Vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM 602-04/21-01/1, UR. BROJ: 251-70-11-21-1 od 02.02.2021. godine priopćujemo temu diplomskog rada koja glasi:

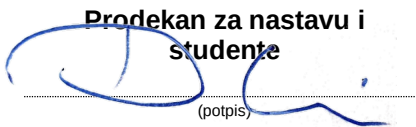
ODREĐIVANJE POZICIJE KORISNIKA ZA OPTIMALNIJU PODZEMNU NAVIGACIJU PRI SPAŠAVANJU PRIMJENOM SGS-A

Za voditelja ovog diplomskog rada imenuje se u smislu Pravilnika o diplomskom ispitu izv. prof. dr. sc. Dalibor Kuhinek, izvanredni profesor Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu.


(potpis)
Voditelj
Izv. prof. dr. sc. Dalibor
Kuhinek
(titula, ime i prezime)

**Predsjednik povjerenstva za
završne i diplomske ispite**


(potpis)
Doc. dr. sc. Dušavko
Domitrović
(titula, ime i prezime)


(potpis)
**Prodekan za nastavu i
studente**
Izv. prof. dr. sc. Dalibor
Kuhinek
(titula, ime i prezime)

ODREĐIVANJE POZICIJE KORISNIKA ZA OPTIMALNIJU PODZEMNU NAVIGACIJU PRI
SPAŠAVANJU PRIMJENOM SGS-A

Karlo Weiser

Rad izrađen: Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet
Zavod za rudarstvo i geotehniku
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Sažetak

Sustav za podzemnu navigaciju pri spašavanju (eng. Subterranean Guidance System – SGS) trenutno se sastoji od prototipa uređaja koji korisniku omogućava navigiranje kroz rudnike i općenito podzemne prostorije. Optimizacijom i daljnjim razvojem SGS bi mogao zamijeniti konvencionalne načine navigacije kroz rudnike, prvenstveno u kriznim situacijama, a potencijalno po potrebi i tijekom normalnog rada.

Ovaj rad opisuje predložena unapređenja sustava koja bi uvela funkciju praćenja lokacije korisnika u stvarnom vremenu. Predlaže se razvoj integriranog sustava koji primjenjuje RFID tehnologiju i inercijski sustav navigacije (INS) kako bi se postigla lokalizacija korisnika, praćenje lokacije i prikaz lokacije korisniku, a i računalu na površini. Analizirane su prednosti i nedostaci ovih tehnologija, te smjer u kojem treba ići sa svrhom razvoja optimalnog rješenja ove problematike. Radi povezivanja ovih sustava predložena je i nadogradnja softvera.

RFID će služiti za određivanje grube lokacije na temelju niskofrekventnih ili visokofrekventnih odašiljača i postavljenih čitača na ključne točke u rudniku. INS će služiti za određivanje točne lokacije između dva čitača. Nadogradnje softvera omogućiti će procjenu lokacije točnom interpretacijom i povezivanjem mjerenih podataka ovih sustava.

Ključne riječi: spašavanje u rudnicima, podzemna navigacija, RFID, inercijski sustavi navigacije, SGS

Završni rad sadrži: 41 stranicu, 4 tablice, 22 slike i 23 reference.

Jezik izvornika: Hrvatski

Pohrana rada: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta, Pierottijeva 6, Zagreb

Mentor: izv. prof. dr.sc. Dalibor Kuhinek, dipl. ing.

Ocjenjivači: izv. prof. dr.sc. Dalibor Kuhinek, dipl. ing.
doc. dr. sc. Mario Klanfar, dipl. ing.
doc. dr. sc. Vinko Škrlec, dipl. ing.

LOCATION DETERMINATION FOR OPTIMAL SUBTERRANAEAN NAVIGATION WITH APPLICATION OF SGS

Karlo Weiser

Thesis completed at: University of Zagreb
Faculty of mining, Geology and Petroleum Engineering
Institute of mining and geotechnics
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Abstract

Subterranean Guidance System (SGS) currently consists of a prototype that enables the user to navigate through mines and other underground objects. With optimization and further development, SGS could replace conventional ways of navigation through mines, with its main purpose being navigation during accidents.

This paper describes proposed improvements of the system that would implement a function of real-time location tracking. It proposes development of an integrated system that applies a combination of RFID technology and inertial navigation system (INS). Main goals of further development are localization of the user, location tracking and its display to the user and the control center on the surface. System's advantages and disadvantages were analyzed based on which new goals were set in order to achieve optimization. To connect these technologies, a software upgrade is proposed.

RFID will be applied to determine a rough location of the user based on low frequency (LF) and high frequency (HF) readers placed on key points in a mine, such as a crossroad. INS will be applied to determine a precise location of the user between two readers. Software upgrades will enable location estimation with precise interpretation and connection of RFID and INS technologies.

Keywords: mine search and rescue, underground navigation, RFID, inertial navigation system, SGS

Thesis contains: 41 page, 4 tables, 22 figures, and 23 references.

Original in: Croatian

Archived in: Library of Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, Pierottijeva 6, Zagreb

Supervisor: Associate Professor Dalibor Kuhinek, PhD

Reviewers: Associate Professor Dalibor Kuhinek, PhD
Assistant Professor Mario Klanfar, PhD
Assistant Professor Vinko Škrlec, PhD

Defense date: 12th February, 2021, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, University of Zagreb

SADRŽAJ

1.	UVOD	1
2.	RAZVOJ I OPIS UREĐAJA	2
2.1.	Primjena uređaja	2
2.2.	Dijkstrin algoritam u SGS-u.....	2
2.3.	Logički princip rada uređaja	3
2.4.	Hardver uređaja	10
3.	OPIS RFID TEHNOLOGIJE	13
3.1.	Opis tehnologije i način rada.....	13
3.2.	Izvori napajanja RFID odašiljača	15
3.3.	Radne frekvencije RFID odašiljača	16
3.4.	Područja primjene.....	18
3.5.	RFID u rudarstvu	20
3.6.	Određivanje lokacije pomoću RFID-a.....	23
4.	OPIS INERCIJSKOG SUSTAVA NAVIGACIJE (INS-a).....	25
4.1.	Način rada lokalizacije pomoću IMU-a.....	25
4.2.	INS u rudarstvu.....	27
5.	PRIMJENA RFID I INS TEHNOLOGIJA U SGS-U	30
5.1.	Opis integriranog sustava za praćenje lokacije	31
5.1.1.	RFID u SGS-u.....	31
5.1.2.	INS u SGS-u	34
5.2.	Unapređenje softvera SGS-a	36
6.	ZAKLJUČAK.....	38
7.	LITERATURA	39

POPIS SLIKA

Slika 2-1 Početni zaslon SGS-a (Brozović i dr., 2020)	4
Slika 2-2 Prikaz generirane karte i radnog prozora SGS-a (Brozović i dr., 2020)	5
Slika 2-3 Prozor koji se otvara po dolasku do cilja (Brozović i dr., 2020)	7
Slika 2-4 Prozor koji se otvara kada su svi putevi zapriječeni (Brozović i dr., 2020)	7
Slika 2-5 Prozor koji se otvara po povratku na početnu točku (Brozović i dr., 2020).....	8
Slika 2-6 Shema rada SGS-a (Brozović i dr., 2020)	9
Slika 2-7 Slika hardverskih komponenti uređaja SGS (Brozović i dr. 2020).....	10
Slika 2-8 Raspberry Pi 4 B (Wikipedia, 2019)	11
Slika 2-9 Joy-IT Akrilno kućište (Joy-IT, 2020)	11
Slika 2-10 Joy-IT Zaslon na dodir (Joy-IT, 2020)	12
Slika 3-1 Pasivni RFID odašiljač (IT Law Wiki, 2020)	14
Slika 3-2 Područja primjene RFID-a (Jung i Lee, 2015).....	18
Slika 3-3 Područja primjene RFID-a u rudarstvu (Mishra i dr., 2014)	20
Slika 3-4 Primjena RFID-a u miniranju prije detonacije (Singh i Mishra, 2016).....	22
Slika 3-5 Primjena RFID-a u miniranju poslije detonacije (Singh i Mishra, 2016)	22
Slika 4-1 Shematski dijagram IMU-ove procjene visine i lokacije (Zhang i dr. 2020)	27
Slika 4-2 Model CM-a na kojem se razvijao INS (Dunn i dr., 2012)	28
Slika 4-3 Blok dijagram veze između IMU senzora i vanjskih izvora (Dunn i dr., 2012).....	29
Slika 5-1 Topologija RFID mreže u rudniku ugljena (Hon i dr., 2015).....	32
Slika 5-2 Potreban razmak RFID čitača	33
Slika 5-3 Mikro IMU (Höflinger i dr., 2012).....	34
Slika 5-4 Korekcija greške lokacije uređaja s obzirom na granice hodnika.....	37

POPIS TABLICA

Tablica 3-1 Podjela RFID uređaja prema radnoj frekvenciji (Hon i dr., 2015).....	17
Tablica 3-2 Klasifikacija tehnika za praćenje lokacije (Mishra i dr., 2014).....	23
Tablica 5-1 Opis funkcija RFID-a i INS-a u sklopu SGS-a	30
Tablica 5-2 Specifikacije komponenti mikro IMU-a (Höflinger i dr., 2012).....	35
Tablica 5-3 Usporedba nekalibriranih i kalibriranih senzora (Höflinger i dr., 2012)	35

POPIS KRATICA

SGS – uređaj za podzemnu navigaciju pri spašavanju (*Subterranean Guidance System*)

DA – Dijkstrin algoritam

LF – niska frekvencija (*low frequency*)

HF – visoka frekvencija (*high frequency*)

UHF – ultra visoka frekvencija (*ultra high frequency*)

RFID – Radiofrekvencijska identifikacija (*Radio-frequency identification*)

AIDC – tehnologija za automatsku identifikaciju i pohranu podataka (*automatic identification and data capture*)

SAD – Sjedinjene Američke Države

PAYT – „plati koliko baciš“, model upravljanja otpadom pokrenut od strane EU (*Pay-As-You-Throw*)

EU – Europska Unija

FDA – američka federalna agencija za hranu i lijekove (*Food and Drug Administration*)

EM – elektromagnetsko

RTSS – sustav sa senzorima za praćenje područja u stvarnom vremenu (*real-time sensing system*)

RTLS – sustav za određivanje lokacije u stvarnom vremenu (*real-time location system*)

INS – inercijski sustav navigacije (*inertial navigation system*)

GPS – globalni položajni sustav (*global positioning system*)

IMU – inercijska jedinica za mjerenje (*inertial measurement unit*)

UWB – ultra širokopojasni (*ultra-wideband*)

ZUPT – korekcije za stanje mirovanja (*zero-velocity update*)

DOF – stupnjevi slobode kretanja (*degrees of freedom*)

ACARP – Australsko Udruženje za razvoj u eksploataciji ugljena (*Australian Coal Association Research Program*)

RDTG – grupa za razvoj pristupnih hodnika i puteva (*Roadway Development Task Group*)

CM – otkopni stroj kontinuiranog načina rada s brazdama na radnom alatu (*continuous miner*)

MEMS – mikro eletro-mehanički sustavi (*microelectromechanical systems*)

FPS – kadar po sekundi (*frame(s) per seco*)

POPIS MJERNIH JEDINICA

Kratica	Puni naziv	Upotreba
g	gram	masa
m	metar	duljina
mm	milimetar	duljina
dm	decimetar	duljina
km	kilometar	duljina
cm³	centimatar kubni	volumen
kHz	kiloherc	frekvencija
MHz	megaherc	frekvencija
GHz	gigaherc	frekvencija
Mb/s	megabit po sekundi	brzina prijenosa podataka
h	sat	vrijeme
g	G-sila, drugi izraz za m/s^2	ubrzanje
m/s²	metar po sekundi na kvadrat	ubrzanje
°/sec ili °/s	stupanj po sekundi	kutna brzina
Gs ili G	gauss	magnetna indukcija
nT	nanotesla	magnetna indukcija

POPIS OZNAKA

Kratica	Puni naziv	Upotreba
<i>D</i>_{INS}	domet pouzdanosti INS-a	slika 5-2
<i>D</i>_{RFID}	domet RFID čitača	slika 5-2
<i>d</i>_n	neiskorišten domet INS-a	slika 5-2
<i>d</i>_{gr}	područje kumulativnih greški INS-a	slika 5-2
<i>G</i>_{dop}	područje dopuštene greške INS-a	slika 5-4

1. UVOD

Tema ovoga rada je opis prototipa uređaja za podzemnu navigaciju pri spašavanju, eng. - “Subterranean Guidance System” (kasnije u tekstu SGS). SGS ima potencijal zamjene konvencionalnih načina navigiranja pri spašavanju, kao što su papirnate karte i provođenje telefonskih kablova kroz rudnik. te analizirati predložena unapređenja vezana za prijenos informacija iz rudnika do površine.

Za bolju navigaciju potrebno je da uređaj ima kvalitetniju informaciju o poziciji korisnika između sjecišta hodnika, te se predlaže da se navedeno implementira korištenjem RFID tehnologije. Za potrebe preciznijeg određivanja lokacije razmotriti će se inercijski navigacijski sustavi (INS).

Proučavanjem postojeće stručne literature i iskustvima autora, analizirati će se prednosti i nedostaci ovih tehnologija, te će se opisati predloženo rješenje njihove kombinirane primjene s ciljem preciznog određivanja lokacije korisnika u podzemnom objektu.

Ovaj diplomski rad predstavlja nastavak rada koji je predan na natječaj za rektorovu nagradu za akademsku godinu 2019./2020. studenata Brozović, Ćesić i Weiser pod nazivom „Razvoj uređaja za podzemnu navigaciju pri spašavanju (*Development of Subterranean Guidance System - SGS*)“ (Brozović i dr., 2020). Detaljan opis načina rada, područje primjene, postupak izrade i razvoja softvera koji uređaj koristi, te ideje za daljnji razvoj dostupni su u spomenutom radu.

2. RAZVOJ I OPIS UREĐAJA

Primarni razlog razvoja ovoga uređaja bila je želja za omogućavanjem jednostavnog i brzog načina navigacije kroz podzemne prostorije za sve članove spasilačke službe, neovisno o njihovom prethodnom poznavanju tlocrta podzemnog objekta i nepredvidivim uvjetima koji se događaju u takvim situacijama (Brozović i dr., 2020).

2.1. Primjena uređaja

Cilj SGS-a je omogućiti navigaciju kroz nepoznate podzemne prostore, te praćenje lokacije spasilačke grupe u stvarnom vremenu bez ovisnosti o vanjskim i unutrašnjim čimbenicima. SGS može zamijeniti karte i slične metode navigacije u potpunosti. Također, mogao bi u kasnijim stadijima razvoja ukloniti čimbenik poznavanja podzemnog objekta, te omogućiti da se zapažanja tijekom spašavanja mogu zapisati u uređaju na interaktivnoj digitalnoj karti. U konačnoj inačici SGS-a sve potrebne informacije i karakteristike moći će se pohraniti u uređaju, te prikazati u sučelju po potrebi (Brozović i dr., 2020)

2.2. Dijkstrin algoritam u SGS-u

Tijekom razvoja SGS-a, odabrao se Dijkstrin algoritam kao temelj programa kroz koji SGS obavlja svoj rad. Dijkstrin algoritam (DA) je jedan od najpopularnijih algoritama u računalnim znanostima i operativnom istraživanju. 1959. godine Edsger W. Dijkstra objavio je rad u časopisu „*Numerische Mathematik*“. U tom radu Dijkstra je predložio algoritme za dva teoretska problema grafova: *problem minimalnog razapinjajućeg stabla* i *problem najkraćeg puta* (Brozović i dr., 2020).

Princip rada DA je da na zadanom grafu s poznatim točkama odredi najkraći put od zadane početne točke A do zadane konačne točke B. Poznate točke moraju biti definirane preko međusobne udaljenosti ukoliko između njih postoji put ili preko koordinata na apscisi i ordinati. Preko poznatih koordinata se može proračunati udaljenost točaka između kojih

postoji put. Te udaljenosti mogu biti unaprijed proračunate ili izmjerene, a zatim i zapisane. Druga mogućnost je da se osigura način da s unosom koordinata točaka bude automatski proračunata vrijednost udaljenosti i zapisana. Algoritam prolazi sve točke na grafu, zbraja njihove međusobne udaljenosti, te potom razvrstava dobivene udaljenosti od najmanje do najveće. Kada se analiziraju sve vrijednosti, iskazuje se onaj put čija suma ima najmanji iznos (Sniedovich, 2006). Dijkstrin algoritam je prepoznat kao idealno rješenje i podloga za izradu SGS-a, s obzirom da na jednostavan i pouzdan način pronalazi najkraći put, što je osnovna ideja principa rada SGS-a. (Brozović i dr., 2020).

DA ima dva glavna ograničenja. Prvo ograničenje je činjenica da svaki put pri pokretanju pretražuje sve čvorove. Za manje rudnike to nije problem, s obzirom da nemaju veliki broj čvorova i hodnika. Međutim, pri većem broju čvorova i hodnika pokretanje DA je zahtjevno s gledišta procesorske snage. Drugo ograničenje je nemogućnost uključivanja negativnih vrijednosti u algoritam. Ovo ograničenje nije presudno za rad SGS-a, ali otežava eventualna poboljšanja dodavanjem negativnih vrijednosti pojedinim točkama ili hodnicima za precizniju navigaciju i/ili neku drugu funkciju samog uređaja (Rehman i dr., 2019).

2.3. Logički princip rada uređaja

Sve točke, odnosno čvorišta rudnika se moraju unaprijed unijeti u program putem koordinata u Kartezijevom koordinatnom sustavu. Oblik u kojem se koordinate točaka zapisuju je N-terac. N-terci su sljedovi vrijednosti koje mogu biti bilo koje vrste. Vrijednosti se razdvajaju, odnosno označavaju cijelim brojevima i prema tome su slični listama. N-terci se razlikuju od lista po tome što su nepromjenjivi (Downey, 2015).

Primjer N-terca koji se koristi u SGS-u:

$$'1' = ('78', 'jabuka')$$

Pomoću gore napisanog N-terca pod imenom *1* definirala se duljina hodnika *Jabuka*. Skup više takvih N-teraca koji definiraju točke rudnika nalaze se u rječniku koji je definirao rudnik

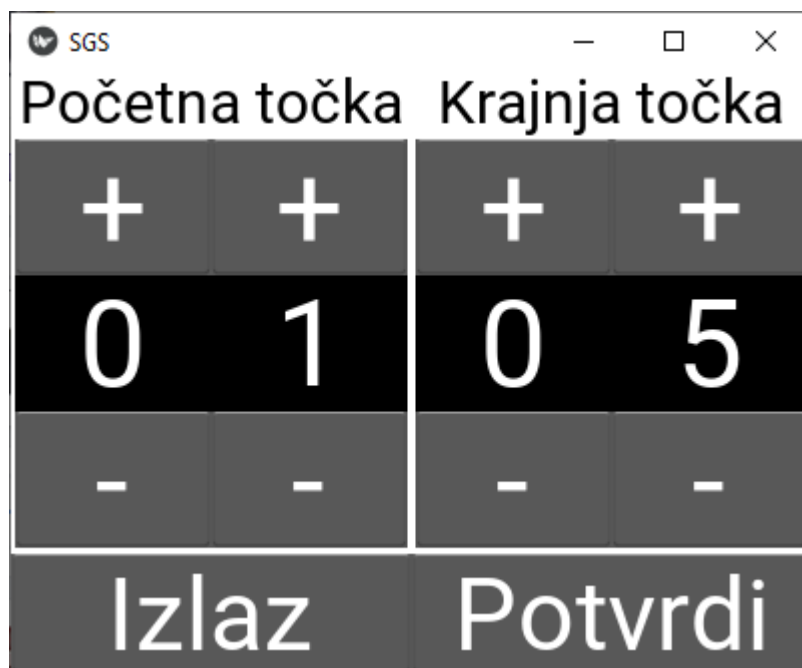
za simulaciju. Takav rječnik koji sadrži više vrijednosti za jedan ključ naziva se multirječnik (Beazley i Jones, 2013). Svaki zapis u rječniku Pythona može se podijeliti na dva dijela:

ključ : vrijednost

Ključ je dio zapisa preko kojega se dohvaća njemu zadana vrijednost (Hruška, 2018).

Odabirom i potvrdom početne i krajnje točke na prozoru sa slike 2-1 program napravi nekoliko radnji:

- pohranjuje početnu točku u zasebnu varijablu za kasnije korištenje
- poziva DA da pronade najkraći put i pohranjuje ga u novu varijablu
- uzima prvu točku i prvu slijedeću točku koja se nalazi na najkraćem putu, te poziva drugi algoritam koji generira dio karte s te dvije točke
- sprema generiranu kartu
-

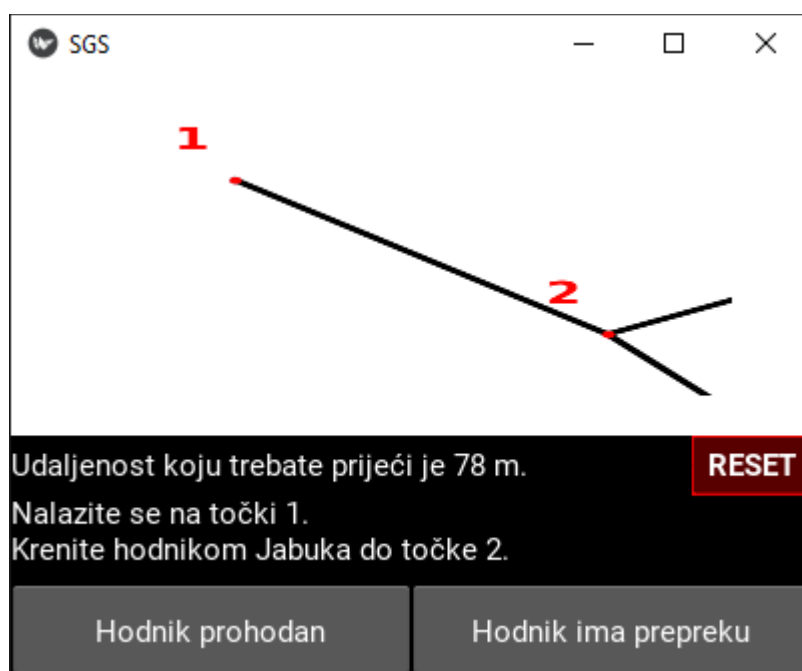


Slika 2-1 Početni zaslon SGS-a (Brozović i dr., 2020)

Algoritam za generiranje karte uzima točke, pronalazi ih na x-y grafu i pridodaje im imena. Zatim algoritam uzima koordinate točaka, pridodaje im vrijednost od +0,2 ili -0,2 ovisno o

poziciji u rudniku. Broj točaka koje se koriste pri generiranju ovisi o značaju za segment karte koji generira. Razlog promjene vrijednosti je preglednost generirane karte. Generirana karta se sprema u .jpg formatu, te ju onda program učitava i prikazuje u radnom prozoru (Brozović i dr., 2020).

Po završetku svih gore navedenih radnji korisniku se prikaže drugi prozor s generiranom kartom i uputama, generirana karta prikazuje točku s koje je korisnik došao, točku na kojoj se nalazi i točku prema kojoj treba krenuti. Primjer generirane karte prikazan je na slici 2-2.



Slika 2-2 Prikaz generirane karte i radnog prozora SGS-a (Brozović i dr., 2020)

Treba uzeti u obzir da je generirana karta sekundarni mehanizam orijentacije, a kao primarni mehanizam služi tekstualni dio ispod karte. Tekstualni dio opisuje korisniku sve informacije vidljive na karti, te mu daje uputu prema kojem hodniku treba krenuti uz naziv tog hodnika. Nazivi hodnika nisu nepoznanica u praksi, posebice ako se radi o većem rudniku gdje se to provodi radi jednostavnosti.

Primjer teksta, prikazanog na slici 2-2:

Udaljenost koju trebate prijeći je 78 m.

Nalazite se na točki 1.

Krenite hodnikom Jabuka do točke 2.

Korisnik na ovome prozoru može obavijestiti program kako:

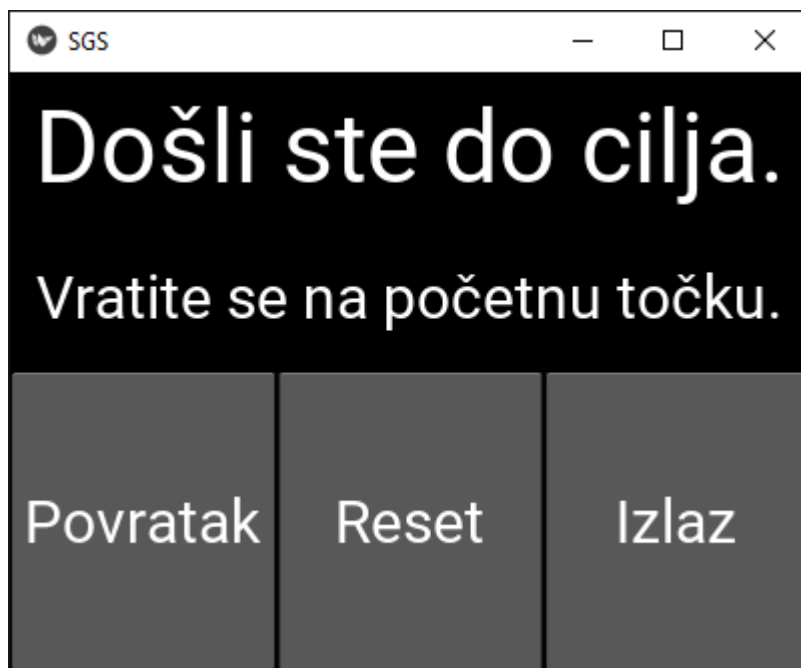
- a) je moguće proći kroz navedeni hodnik – gumb „Hodnik je prohodan“
- b) nije moguće proći kroz navedeni hodnik – gumb „Hodnik ima prepreku“

Odabirom opcije a) program uzima prošlu točku, točku na kojoj se korisnik nalazi i sljedeću točku i ponovo poziva algoritam za generiranje karte. Generirana karta ovaj put prikazuje tri točke. Korisniku se prikazuje radni prozor s novom generiranom kartom, novim uputama i informacijama u tekstualnom obliku, te opet ima iste dvije opcije.

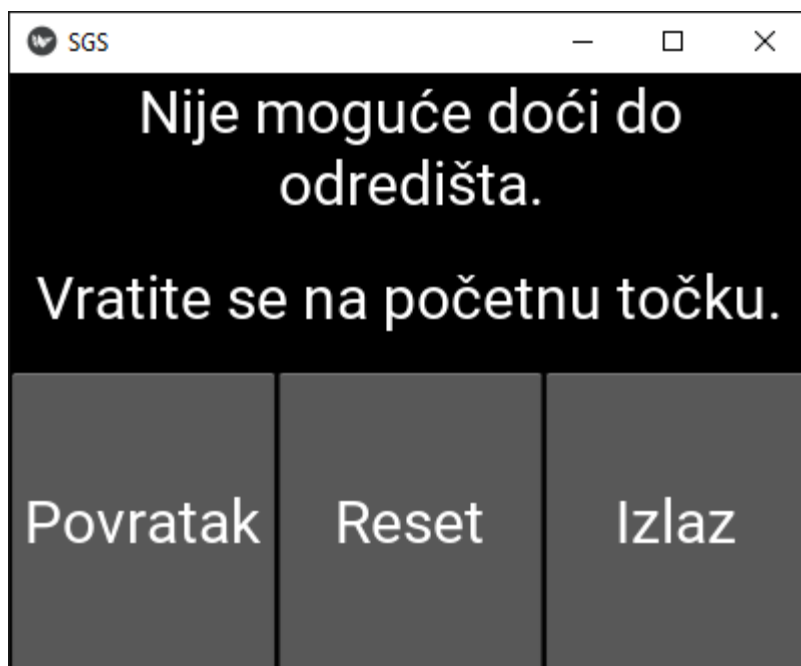
Odabirom opcije b) program ponovo poziva DA radi pronalaska novog najkraćeg puta uzimajući u obzir raniju bilješku da je put prepriječen. Novi najkraći put se pohranjuje, te se ponovo poziva algoritam za generiranje karte (Brozović i dr., 2020).

Cijeli ciklus s ove dvije opcije se ponavlja sve dok:

- 1) korisnik nije došao do zadane krajnje točke, prikazano na slici 2-3
- 2) nisu svi hodnici do zadane krajnje točke prepriječeni, prikazano na slici 2-4



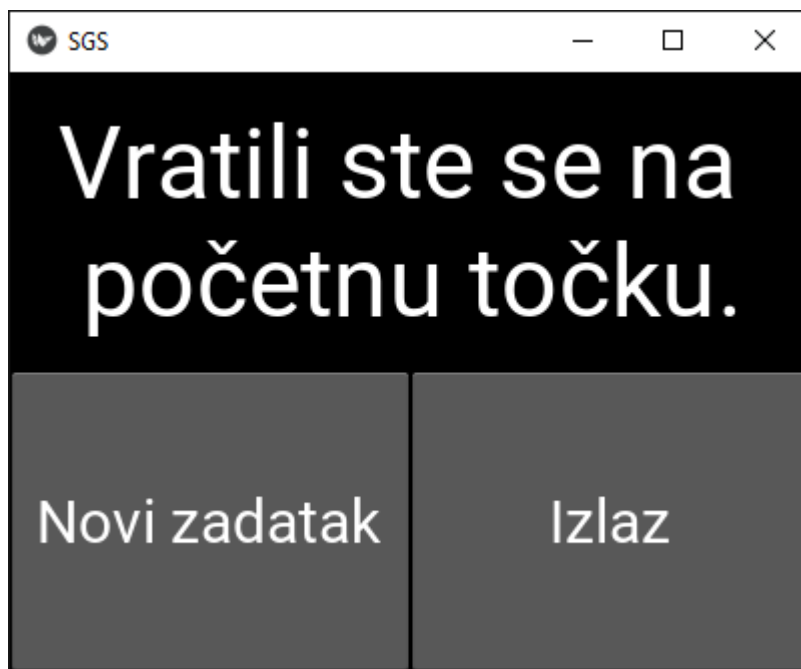
Slika 2-3 Prozor koji se otvara po dolasku do cilja (Brozović i dr., 2020)



Slika 2-4 Prozor koji se otvara kada su svi putevi zapriječeni (Brozović i dr., 2020)

Ako je korisnik došao do zadnje krajnje točke (1), korisniku su ponuđene dvije opcije:

- a) povratak na početnu točku (primjerice ulaz rudnika), prikazano na slici 2-5
- b) zatvoriti program

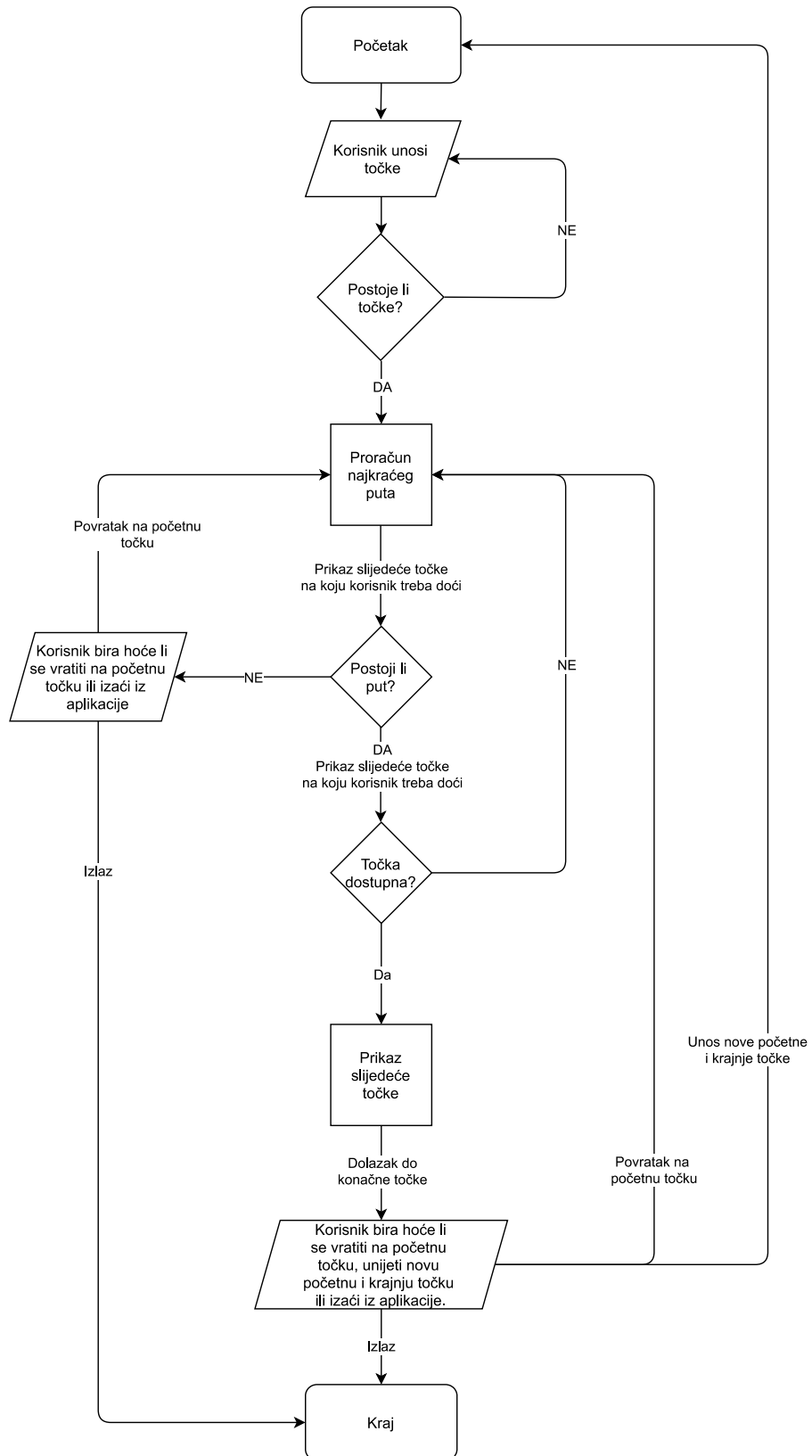


Slika 2-5 Prozor koji se otvara po povratku na početnu točku (Brozović i dr., 2020)

U slučaju opcije a) program očitava početnu točku iz varijable koja je spremljena pri početku rada programa i pamti ju kao krajnju. Točka na kojoj se korisnik nalazi uzima se kao početna, te se cijeli program pokreće ispočetka prema gore opisanom ciklusu. Povratkom na početnu točku korisnik može pokrenuti novi ciklus pritiskom na gumb „*Novi zadatak*“ ili zatvoriti program pritiskom na tipku „*Izlaz*“.

Opcija b) zatvara program i gasi uređaj.

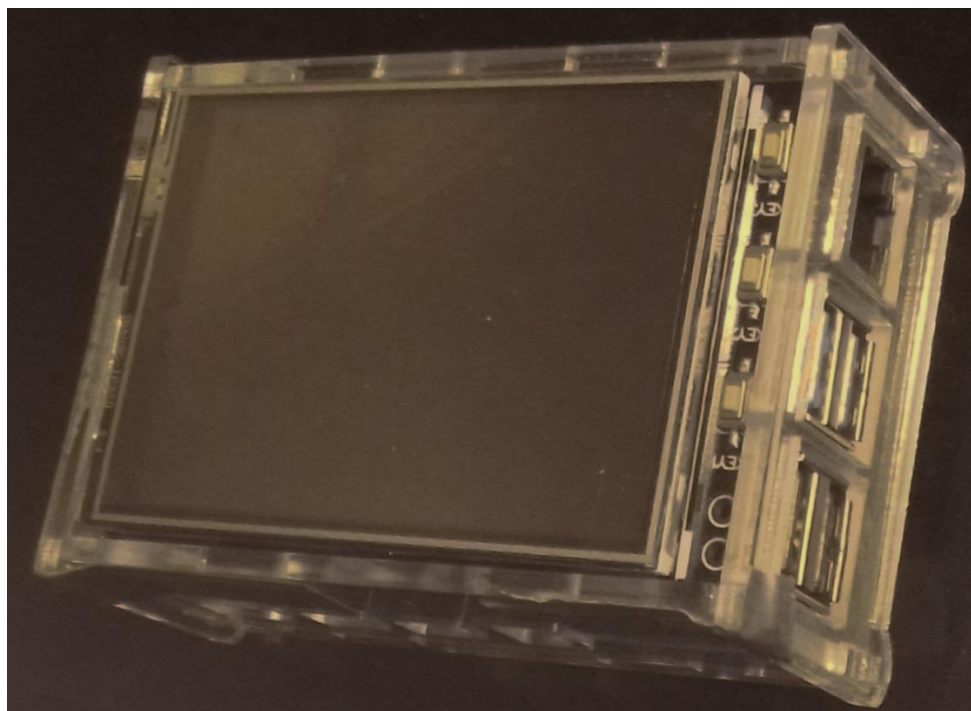
Ako su svi putevi prepriječeni (2), korisnik ima opcije vratiti se na početnu točku ili ugasi uređaj. Početna točka tretira se kao krajnja, a trenutna lokacija (zadnja točka do koje je korisnik uspješno došao) učitava se kao početna. S tim ulaznim podacima pokreće se ranije opisan ciklus. Slika 2-6 prikazuje dijagram tijekom rada programa SGS (Brozović i dr., 2020).



Slika 2-6 Shema rada SGS-a (Brozović i dr., 2020)

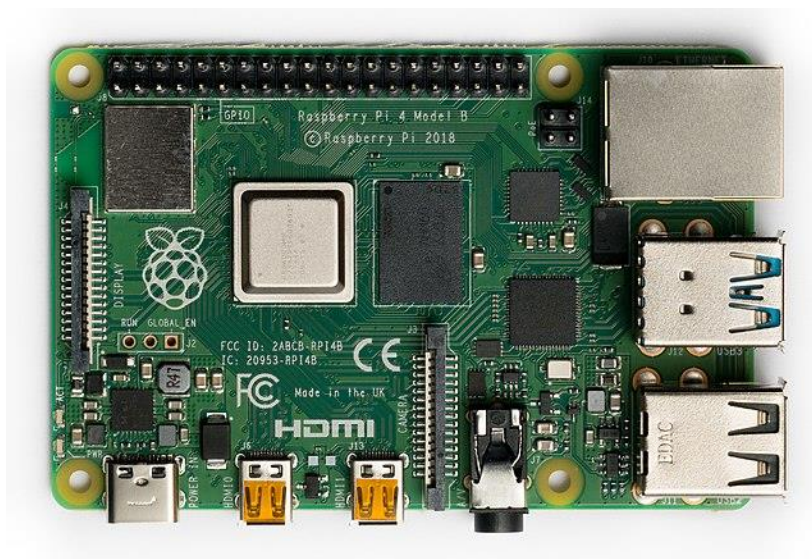
2.4. Hardver uređaja

Radi optimizacije troškova, lakše dostupnosti nekih komponenti te šire podrške za hardverske i softverske komponente budućeg uređaja odlučeno je koristiti mikroračunalo Raspberry Pi i programski jezik Python 3.7.0. Nabavljene su potrebne komponente i na slici 2-7 prikazan je sklopljen prototip SGS-a koji je korišten tijekom izrade programa i testiranja.



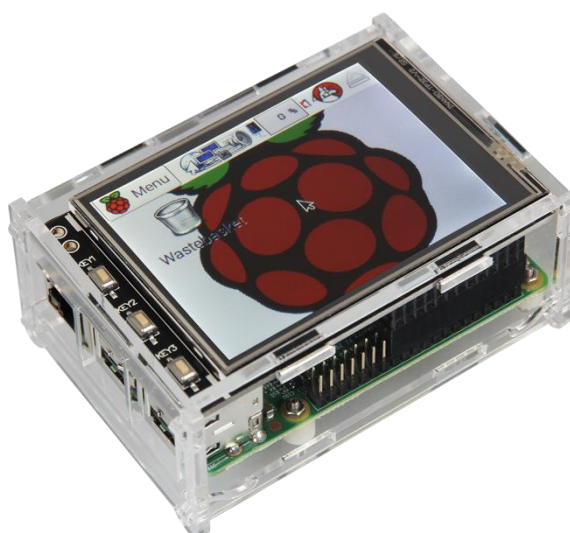
Slika 2-7 Slika hardverskih komponenti uređaja SGS (Brozović i dr. 2020)

Odabrani hardware za prvu inačicu SGS-a je Raspberry Pi 4 model B koji je prikazan na slici 2-8. Raspberry Pi je serija jednopločnih računala proizvedenih u Ujedinjenom Kraljevstvu čija je primarna namjena omogućiti jeftino i pouzdano računalo za učenje osnova računalnih znanosti. Prednost korištenja Raspberry-a za prototip SGS-a je njegov operativni sustav Raspberry Pi OS (tzv. Raspbian) koji je baziran na otvorenom Linux OS-u. Raspbian dolazi s već unaprijed instaliranim programskim jezikom Pythonom što je znatno olakšalo povezivanje programa SGS-a s Raspberry-em (Raspberry Pi Foundation, 2020).



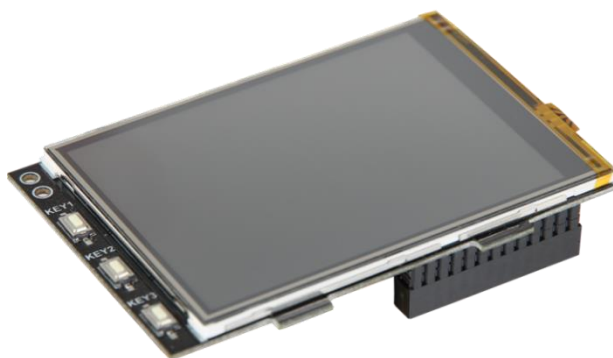
Slika 2-8 Raspberry Pi 4 B (Wikipedia, 2019)

Korišteno je akrilno kućište tvrtke Joy-IT, prikazano na slici 2-9. Tvrtka Joy-IT izradila je ovaj tip kućišta specifično za Raspberry modele B+, 2B, 3B, 3B+ i 4, te se koristi u kombinaciji s njihovim zaslonom na dodir od 3,2 inča ili 3,5 inča. Po sastavu je od transparentnog akrila visoke kvalitete. S obzirom da različiti modeli Raspberry-a imaju drugačije dimenzije, kućište se može podesiti dodatcima koji dolaze u kompletu s kućištem. Masa kućišta je 70 g (Joy-IT, 2020).



Slika 2-9 Joy-IT Akrilno kućište (Joy-IT, 2020)

Uređaj koristi zaslon na dodir prikazan na slici 2-10 koji je proizvela tvrtka Joy-IT. Dijagonala zaslona je 3,2 inča s maksimalnom rezolucijom od 320x240 pixela. Spaja ga se s Raspberry PI-em putem standardnih GPIO utora. Zaslon sadrži tri gumba koji se mogu programirati. Ovaj zaslon je kompatibilan s Raspberry Pi A, B, B+, 2B, 3B, 3B+ i 4B isto kao i kućište, što ih čini potpuno međusobno kompatibilnim za povezivanje software-a SGS-a na bilo koju drugu inačicu Raspberry Pi operativnog sustava. Masa zaslona je 52 g (Joy-IT, 2020).



Slika 2-10 Joy-IT Zaslon na dodir (Joy-IT, 2020)

3. OPIS RFID TEHNOLOGIJE

Radiofrekvencijska identifikacija (RFID) je bežična tehnologija koja spada pod AIDC (eng. *Automatic Identification and Data Capture*), odnosno služi za automatsku identifikaciju i pohranu podataka. RFID sustav jednostavne je strukture; sastoji se od tri važne komponentne:

- 1) odašiljača, koji se ugrađuju ili postavljaju u opremu i/ili proizvod
- 2) čitača i njegovih antena, koji komuniciraju s odašiljačima bez zahtjeva za vidnim poljem
- 3) računala, koje je zaduženo za upravljanje cijelim sustavom kroz prikupljanje i filtraciju RFID podataka, te komuniciranje s ostalim informacijskim sustavima unutar poslovnog objekta (Wamba i dr., 2013)

3.1. Opis tehnologije i način rada

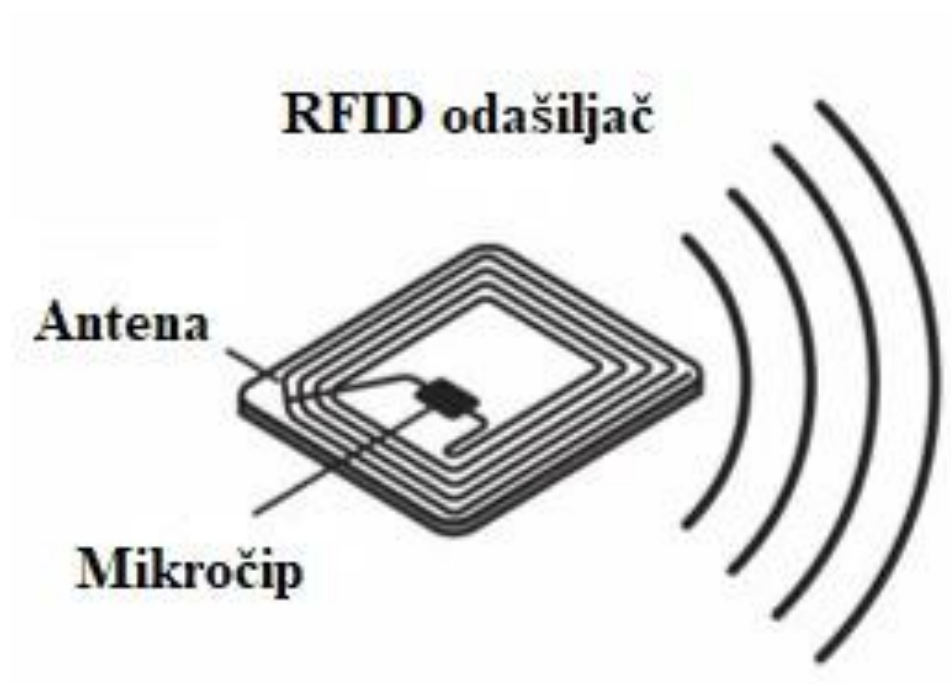
RFID odašiljač se u pravilu sastoji od:

- Mikročipa
- Antene
- Kućišta
- Baterije (ukoliko se radi o aktivnim odašiljačima)

Dimenzije odašiljača najviše ovise o anteni. Veličina i oblik antene su definirani frekvencijom koju odašiljač koristi. Također, dimenzije ovise i o području primjene. S obzirom na područje primjene, dimenzije mogu biti od nekoliko milimetara kod primjerice implanata sve do veličine knjige kod primjerice logistike kontejnera. Uz mikročip, pojedini odašiljači mogu sadržavati i memorijski čip u koji se može ponovno upisati podaci ako je to potrebno. Ona služi za pohranjivanje informacija između radnih ciklusa ili za pohranjivanje novih podataka kao što su serijski brojevi (Jechlitschek, 2010).

Slika 3-1 prikazuje RFID odašiljač. Odašiljač radi tako da jedinica za očitavanje generira elektromagnetno polje koje inducira struju u antenu. Struja služi i za napajanje mikročipa. Kod pasivnih odašiljača ta struja također napuni i kondenzator koji služi za neprekinuto napajanje

mikročipa tijekom cijelog radnog ciklusa. Kod aktivnih odašiljača umjesto kondenzatora ugrađena je baterija. Nakon aktivacije, odašiljač prima naredbu jedinice za očitavanje i odgovara slanjem serijskog broja ili zatražene informacije (Jechlitschek, 2010).



Slika 3-1 Pasivni RFID odašiljač (IT Law Wiki, 2020)

3.2. Izvori napajanja RFID odašiljača

Prema načinu, odnosno izvoru napajanja RFID odašiljače dijele se na:

- pasivne
- polupasivne
- aktivne

Pasivni odašiljači nemaju interni izvor napajanja, stoga se oslanja na napajanje koje inducira jedinica za očitavanje, odnosno čitač. Ovaj način napajanja implicira da čitač mora održati svoje EM polje sve dok razmjena podataka ne završi. Nekorištenje baterije pasivnim odašiljačima daje nekoliko prednosti; male dimenzije, nisku cijena i mogućnost da se proizvode 3D pritajem. Međutim, domet pasivnih odašiljača je između 2 mm i nekoliko metara. Također, velika prednost pasivnih odašiljača je njihova trajnost; smatra se da nemaju rok trajanja zato što ne ovise o internom izvoru napajanja.

Polupasivni odašiljači imaju interni izvor napajanja koji konstantno opskrbljuju mikročip električnom energijom. Prednosti ima mnogo: vrijeme reakcije na zahtjeve je značajno skraćeno, te posljedično tome povećan je broj čitača koji mogu biti očitavani po sekundi što je za neke aplikacije od vitalne važnosti. Nadalje, s obzirom da antena ne služi kao izvor napajanja može ju se optimizirati za povratno rasipanje (eng. backscattering) kako bi se povećao domet. Također, domet se dodatno povećava zato što odašiljač ne koristi energiju EM polja i time pojačava signal povratnog rasipanja.

Aktivni odašiljači poput polupasivnih sadržavaju interni izvor napajanja, ali koriste dostupan izvor energije za napajanje mikročipa i antene. Aktivni odašiljači koji šalju signal bez da im se pošalje upit zovu se radio-farovi (eng. beacon). Domet aktivnih odašiljača je nekoliko desetaka metara, te su kao takvi idealni za određivanje lokacije pojedinih objekata ili kao točke za orijentaciju. Životni vijek im je do 5 godina (Jechlitschek, 2010).

3.3. Radne frekvencije RFID odašiljača

Osim prema izvoru napajanja, RFID uređaji mogu se podijeliti i prema radnoj frekvenciji. Tablica 3-1 prikazuje sažetak podjele s prednostima i nedostacima pojedinih frekvencija. Radne frekvencije RFID čitača su (Jechlitschek, 2010):

- Niska frekvencija (LF, 30 kHz do 500 kHz)
- Visoka frekvencija (HF, 10 MHz do 15 MHz)
- Ultra visoka frekvencija (UHF, 850 MHz do 950 MHz, 2,4 GHz do 2,4 GHz, 5,8 GHz)

Odašiljači koji rade na LF su značajno jeftiniji od odašiljača viših frekvencija. Brzina reakcije im je dovoljna za normalan rad većine aplikacija, međutim za veće količine podataka povećava se i vrijeme unutar kojega odašiljač mora biti u komunikaciji s jedinicom za očitavanje. Dodatna prednost LF odašiljača je činjenica da na njih fluidi i metali imaju najmanji utjecaj. Nedostatak ove vrste odašiljača je kratak domet. Najčešće frekvencije pri kojima ovi čitači rade su 125 kHz do 134,2 kHz i 140 kHz do 148,5 kHz.

Odašiljači koji rade na HF imaju veću brzinu prijenosa podataka i veći domet, ali im je cijena viša od LF odašiljača. „Pametni“ odašiljači spadaju pod ovu grupu, te koriste frekvenciju od 13,56 MHz.

UHF odašiljači imaju najveći domet. Pasivni UHF odašiljači imaju domet od 3 m do 6 m, a aktivni imaju domet od preko 30 m. Također, brzina prijenosa podataka im je vrlo visoka, što omogućuje očitavanje u vrlo kratkom roku. Ova je karakteristika bitna kod primjena gdje se označeni objekti gibaju na vrlo velikim brzinama i samim time ostaju jako kratko u dometu jedinice za očitavanje. UHF odašiljači su najskuplji u usporedbi s ostalima, a i najosjetljiviji su na utjecaj fluida i metala. Tipične radne frekvencije UHF odašiljača su 868 MHz (Europa), 915 MHz (SAD), 950 MHz (Japan) i 2,45 GHz.

Radne frekvencije za LF i HF odašiljače su slobodne za korištenje u cijelom svijetu, dok se zakoni za frekvencije koje koriste UHF čitači razlikuju od zemlje do zemlje i zahtijevaju dozvolu za korištenje (Jechlitschek, 2010).

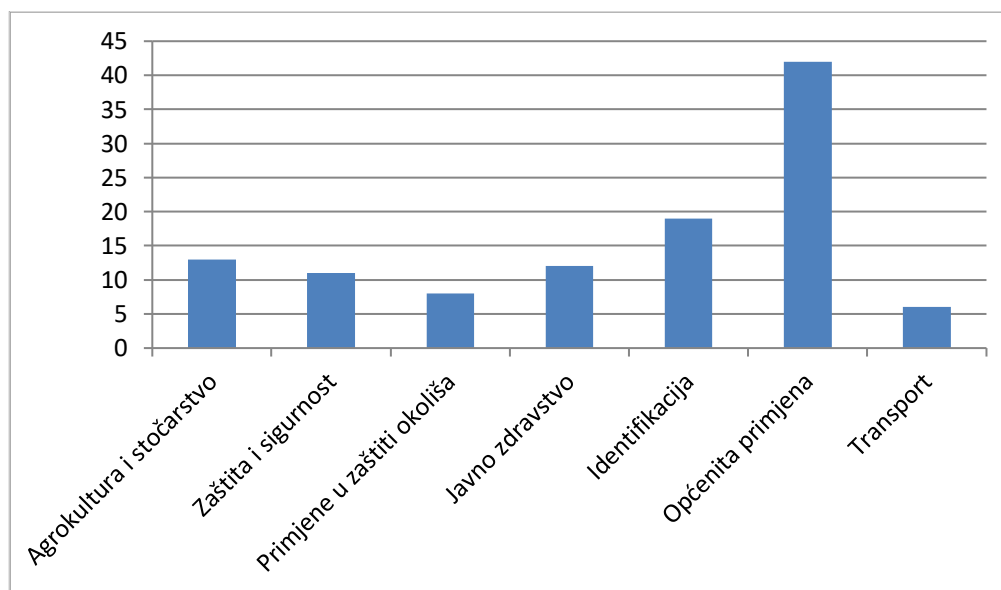
Tablica 3-1 Podjela RFID uređaja prema radnoj frekvenciji (Hon i dr., 2015)

Radna frekvencija	Domet	Prednosti	Nedostatci	Primjena
125 kHz do 134 kHz (LF)	< 0,5 m	- veći otpornost na smetnje - mogućnost konsolidacije u blizini vode - može biti pričvršćen na metalne nosače	- nizak domet - niska brzina komunikacije - visoka antena (solenoid)	- čipovi za identifikaciju životinja - imobilizatori automobila - identifikacija proizvoda od metala
13,56 MHz (HF)	< 1,0 m	- manje dimenzije antene - viša brzina komunikacije od LF - niska cijena RFID privjeska	- metalna podloga i voda značajno smanjuju domet i stvaraju smetnje pri komunikaciji	- beskontaktno plaćanje - oznake u skladištima - snimanje i prijenos mjerenih podataka
860 MHz do 960 MHz (pasivni uređaji) (UHF)	< 6,0 m	- mogućnost daljinskog očitavanja - visoka brzina - dipolna antena - jeftino za proizvodnju	- ne prodire kroz tekućine - teško za očitati ako je na metalnoj podlozi - globalno nedosljedna frekvencija	- praćenje prijevoza paleta - istovremena identifikacija više proizvoda - elektronička cestarina (ENC)
2,4 GHz	> 10 m	- veće brzine, do 2 Mb/s - male dimenzije dipolne antene	- skupa i zahtjevna proizvodnja - jake smetnje (metali, tekućine, itd..)	- elektronička cestarina (ENC) - snimanje i prijenos podataka u stvarnom vremenu

3.4. Područja primjene

RFID je široko implementirana tehnologija u cijelom svijetu, te su njeni utjecaji na svakodnevni život masivni i raznoliki. Područja primjene RFID-a u svijetu uključuju praćenje u logistici, praćenju i održavanje proizvoda, informacije i sigurnost proizvoda, načini plaćanja (Jung i Lee, 2015) i tijekom zadnjeg desetljeća u brojnim industrijama među kojima je i rudarstvo. Slika 3-2 prikazuje deskriptivnu statistiku primjene RFID sustava iz literature.

RFID tehnologija razvijena je nakon što je Frederick Hertz otkrio radio valove tijekom svog eksperimenta 1886. Potreba za njenim razvojem pojavila u svrhu zaštite se tijekom drugog svjetskog rata. RFID je tijekom sedamdesetih i osamdesetih godina prošlog stoljeća privukao pažnju brojnih učenjaka i inovatora, a samim time povećao se broj zahtjeva za patentima (Jung i Lee, 2015).



Slika 3-2 Područja primjene RFID-a (Jung i Lee, 2015)

Prednosti RFID-a su omogućile vojnim snagama SAD-a da razviju sustav za identifikaciju vlastitih i neprijateljskih snaga. Osim identifikacije osoblja, koriste slične sustave i dan danas za praćenje oružja i opreme. Nakon 2001. godine takvi sustavi koriste se i u zračnim lukama radi identifikacije putnika kako bi se spriječili potencijalni napadi. U nekim zemljama RFID

sustavi se koriste za upravljanje zatvorima i za zaštitu djece tako da se bilježe vremena dolaska i odlaska, a samim time bilježe se i lokacije korisnika.

RFID je također pridonio i razvoju „e-putovnica“ koje osim osnovnih podataka sadržavaju i biometričke informacije o vlasniku. Osim putovnica, RFID odašiljači s biometričkim informacijama nalaze se i u modernim inačicama osobnih iskaznica, tzv. „e-ID“.

Europska Unija je pokrenula inicijativu pod nazivom PAYT (eng. Pay-As-You-Throw), koja se bazira na principu proračuna volumena otpada svakog kućanstva. Svaki spremnik za otpad ima ugrađen RFID čitač u sebi, te se na temelju proračunatog volumena vrši naplata. Cilj takvog sustava je potaknuti kućanstva i pojedince na smanjenje količine otpada koji proizvode (Jung i Lee, 2015).

Javni prijevoz također primjenjuje RFID sustave. Pomoću kartica unutar kojih je ugrađen RFID čitač, nadoplatom i očitavanjem kartice pri ulasku u vozilo javnog prijevoza značajno se skratilo vrijeme čekanja u redovima za karte. SAD je jedna od prvih zemalja koja je implementirala takav način naplaćivanja, te ga se smatra efektivnim i efikasnim. Neke zemlje koriste RFID sustave za pri kriminalističkim istraživanjima s obzirom da takvi sustavi omogućuju istražiteljima i tužiteljima da dokažu vrijeme i lokaciju optuženikovog auta.

Javno zdravstvo ima mogućnost primjene RFID sustava kako bi lakše pratili i upravljali opremom i lijekovima. FDA, vladina agencija u SAD-u, primjenjuje RFID odašiljače u praćenju proizvoda farmaceutske industrije. S obzirom da bolnice u SAD-u svakodnevno isporučuju i prepisuju preko 4000 različitih lijekova, moguća je greška pri distribuciji. Zadaća RFID sustava je osigurati da se takve greške ne događaju ili da se svedu na minimum..

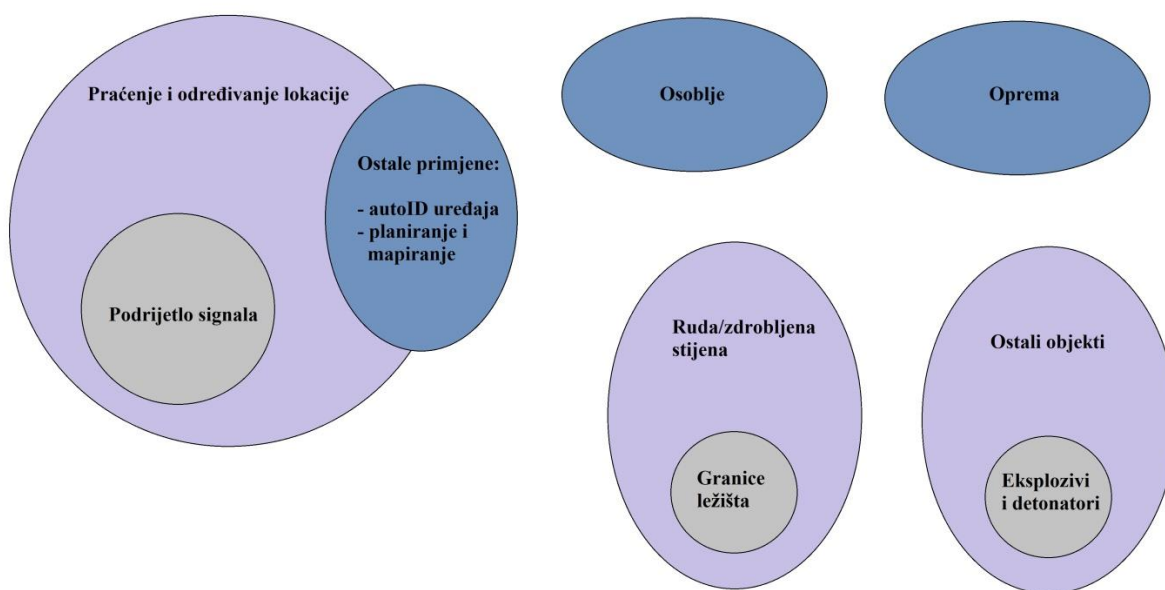
U agrokulturi i stočarstvu, RFID je našao svoju primjenu kod:

- a) praćenja isporuke i upotrebe pesticida
- b) praćenja stoke od rođenja do isporuke
- c) praćenja bolesti i zaraza pojedinih proizvoda iz ovih industrija

Primjerice, u Australiji sva stoka ima ugrađene RFID odašiljače koji omogućavaju uzgajivačima da identificiraju svaku jedinku, te prate i bilježe njeno zdravlje. Ti podaci se pohranjuju u državni registar stoke. Druge zemlje su primijenile slična rješenja s ciljem da se zaraze i bolesti detektiraju i dovedu pod kontrolu unutar 48 sati (Jung i Lee, 2015).

3.5. RFID u rudarstvu

Kao i u mnogim drugim industrijama, u rudarstvu se RFID tehnologija počela razvijati i primjenjivati tek početkom 21. stoljeća, barem u teoriji. Autori Mishra, Stewart i Bolic napravili su podjelu područja primjene RFID-a u rudarstvu koja je prikazana na slici 3-3. Slika 3-3a prikazuje osnovne sektore u kojima RFID ima primjenu u rudarstvu. Oni uključuju praćenje i određivanje lokacije željene kategorije. Pod kategorijama promatranih objekta i osoblja smatra se sve što spada pod krug „podrijetlo signala“ na slici 3-3a, te je njihov sažetak prikazan na slici 3-3b (Mishra i dr., 2014).

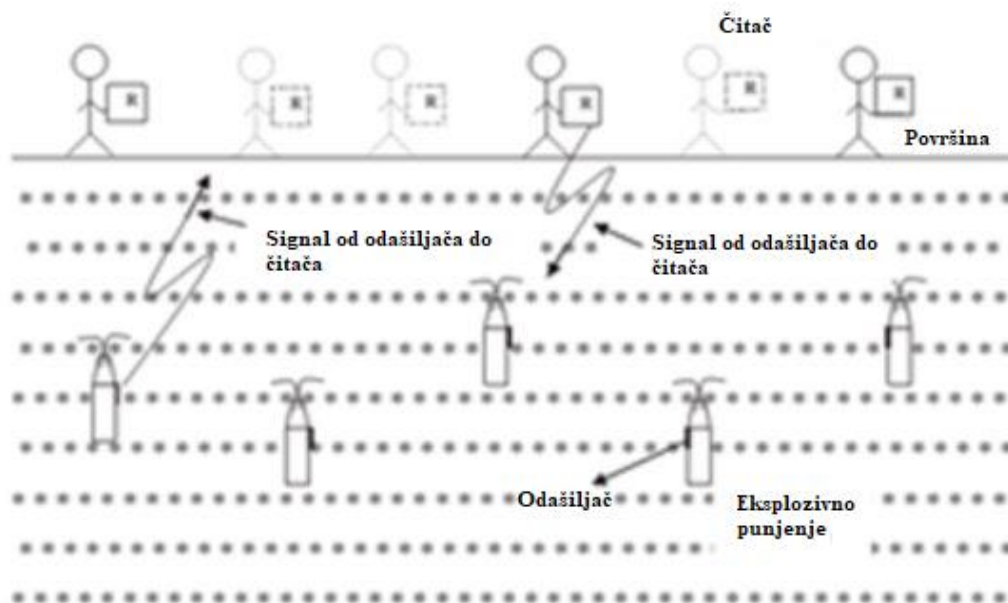


Slika 3-3 Područja primjene RFID-a u rudarstvu (Mishra i dr., 2014)

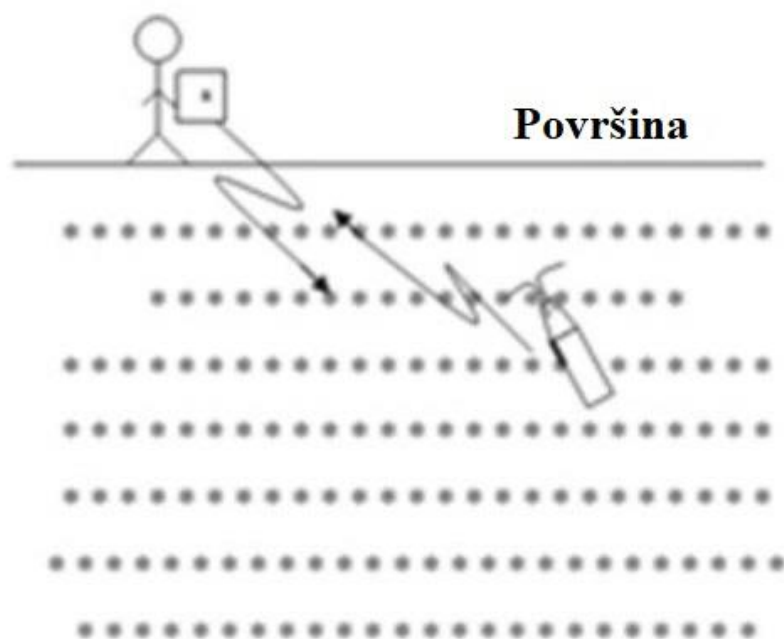
Mnoštvo publikacija opisuje primjenu ove tehnologije u rudnicima, međutim tek se zadnjih godina počelo intenzivnije raditi na konkretnim rješenjima i realizaciji. Primjerice, u studenom 2018. godine startup tvrtka PervCom Consulting iz Indije razvila je kombinirani sustav za praćenje lokacije u stvarnom vremenu koristeći RFID i RTSS tehnologije. Pomoću takvog sustava moguće je omogućiti rudnicima, odnosno poslovođama da istovremeno prate lokaciju zaposlenika i imovine, te okolišnih uvjeta u rudniku (Frieldos, 2018).

Jedan od ranijih slučajeva primjene RFID-a u rudnicima provela je internacionalna rudarska grupacija Xstrata. U 2008. godini je tvrtka kupovala nove rudarske lampe za svoj rudnik Beltana Coal Mine u australskoj državi New South Wales, te su odlučili u lampe ugraditi aktivne RFID odašiljače. 200 odašiljača su spojili u mrežu pomoću koje su htjeli povećati sigurnost rudara, ali i njihovu produktivnost (Frieldos, 2008).

Od svih opisanih funkcija RFID-a, najveći potencijal primjene za rudarsku industriju je praćenje lokacije osoblja i opreme, mjerenje atmosferskih uvjeta u rudnicima, ali i kao mjera sigurnosti pri metodi eksploatacije koja se zove bušenje i miniranje. Naime, pri podzemnom miniranju jedna od velikih opasnosti je zatajenje detonatora. Ukoliko pri detonaciji ne dođe do otpucavanja, nedetonirani eksploziv koji ostaje u bušotini predstavlja opasnost zbog mogućnosti naknadne detonacije uslijed planiranih ili neplaniranih pomicanja stijenske mase. Kako bi se prepoznale bušotine unutar kojih nije došlo do detonacije, RFID odašiljači mogu se postaviti na detonatore ili u eksplozivno punjenje. Slike 3-4 i 3-5 prikazuju očitavanje signala pojedinih odašiljača prije i poslije detonacije. Takva praksa provjerava dvije stvari; da su sve bušotine napunjene i spremne za detonaciju prije otpucavanja (slika 3-3) i ima li bušotina unutar kojih nije došlo do detonacije nakon otpucavanja (slika 3-4). Takvi RFID odašiljači moraju biti izdržljivi u surovim okruženjima, otporni na vibracije i niske cijene proizvodnje. Također, njihov signal mora prodirati kroz stijensku masu kako bi mogao doći do čitača (Singh i Mishra, 2016).



Slika 3-4 Primjena RFID-a u miniranju prije detonacije (Singh i Mishra, 2016)



Slika 3-5 Primjena RFID-a u miniranju poslije detonacije (Singh i Mishra, 2016)

3.6. Određivanje lokacije pomoću RFID-a

S obzirom da je svrha ovoga rada također odabrati i optimalnu vrstu RFID odašiljača za određivanje lokacije, potrebno je proučiti i mogućnosti pojedinih vrsti odašiljača u podzemnim prostorijama. Tablica 3-2 prikazuje koje su vrste odašiljača podobne određenoj vrsti zadatka, odnosno načinu obavljanja željene funkcije.

Tablica 3-2 Klasifikacija tehnika za praćenje lokacije (Mishra i dr., 2014)

Pristup	Metoda	Konfiguracija	Vrsta RFID-a
Odrediti trenutak ulaza i izlaza odašiljača	Sustavi detektiranja temeljeni na portalima	Detekcija temeljena na zonama: zone su zatvorene	LF, HF i UHF RFID, RuBee tehnologija
Detekcija prisustva odašiljača	Detekcija u zoni očitavanja jedinice za očitavanje	Detekcija temeljena na zonama i gruboj lokalizaciji	UHF RFID, aktivni RFID
Lokalizirajući mobilni odašiljači	Metode lokalizacije	Sustavi za određivanje lokacije u stvarnom vremenu (RTLS-ovi)	Aktivni RFID
Lokalizirajući mobilni čitači	Čitači detektiraju nepomične odašiljače	Obrnuta konfiguracija RFID sustava	UHF RFID, aktivni RFID
Detekcija na principu neposredne blizine (bez lokalizacije)	Čitači detektiraju odašiljače unutar dometa, mora biti površinom manja zona	Detektiranje objekata u neposrednoj blizini	LF, HF, UHF RFID (čitači su skupi), aktivni RFID
Korištenje <i>ad hoc</i> mreže	Mreže bežičnih senzora	Sustavi koji se temelje na radio-čvorovima	ZigBee ili slične tehnologije

S gledišta same praktičnosti, gotovo pa svi pristupi opisani u tablici 3-2 pokazuju potencijal za primjenu u SGS-u. Međutim, ako se uzmu u obzir i drugi čimbenici kao što su smetnje koje utječu na UHF i aktivne RFID sustave, cijena, te činjenica da se kod rudnika razgovara o potencijalno tisućama kilometara hodnika izbor optimalnog pristupa se može suziti. S obzirom na navedene čimbenike, najveći potencijal prikazuju prva dva pristupa iz tablice 3-2, odnosno sustavi na temelju portala ili na temelju neposredne blizine.

Sustavi na temelju portala zahtijevaju postavljene čitače na ključnim točkama u rudniku (npr. sjecište hodnika) i odašiljače na osoblju, odnosno spasiocu. Prolaskom odašiljača kroz „portal“ koji je postavljen na ključnu točku, dolazi do slanja signala u čitač. Naravno, ovim pristupom se ne određuje točna lokacija, već njena gruba procjena. Prednost ovakvog sustava definitivno je cijena, s obzirom da je potrebno osigurati domet od nekoliko metara.

Sustavi koji se temelje na neposrednoj blizini mogu se izvesti na više načina, ovisno o vrsti RFID-a koja se primjenjuje. Kao i u prošlom slučaju, kod ključnih točaka u rudniku se trebaju postaviti čitači koji će očitavati signale svih odašiljača u dometu. S povećavanjem frekvencije se postižu i veći dometi, ali isto tako rastu cijena i smetnje. Ovaj način, iako nema direktne lokalizacije, može pružati grubu procjenu lokacije pojedinog odašiljača s obzirom na jačinu signala koja dolazi do njega. Preduvjet za takav način „lokalizacije“ je dovoljno gusta mreža koja opet povećava cijenu cijelog sustava.

Oba predložena sustava rješavaju većinu problema RFID-a u rudnicima, ali imaju smanjenu preciznost lokalizacije što je u ovom slučaju glavni cilj. Iz tog se razloga predlaže razvoj integriranog sustava koji koristi RFID za grubu lokalizaciju, a inercijski sustav navigacije (INS) za preciznije određivanje lokacije između ključnih točaka na kojima su postavljene RFID stanice.

4. OPIS INERCIJSKOG SUSTAVA NAVIGACIJE (INS-a)

Inercijski sustav navigacije je metoda navigiranja i lokalizacije koja je neovisna o ostalim kao što je primjerice GPS. Upravo zbog njegove neovisnosti se koristi u kombinaciji s GPS-om kod integriranih sustava navigacije. Iako se ovdje priča o cijelom sustavu, glavni dio INS-a je inercijska jedinica za mjerenje (IMU). Podaci pomoću kojih se određuje lokacija prikupljaju se pomoću komponenti IMU-a, a to su:

- akcelometar
- magnetometar
- žiroskop

Određivanje lokacije, odnosno lokalizacija provodi se uzimajući u obzir lokaciju, brzinu kretanja i smjer kretanja (Aparna i dr., 2020). Trenutno postoji mnoštvo različitih IMU-a koje su razvili ili ih razvijaju znanstveni timovi u istraživačke svrhe, ali postoje i komercijalno dostupni IMU-ovi. Učinak IMU-a generalno rečeno ovisi o frekvencijskom opsegu (eng. Bandwidthu), posmaku (eng. Driftu), linearnosti i brzini uzorkovanja senzora. Kod sustava i uređaja koji zahtijevaju mobilnost potrebni su IMU-ovi manjih dimenzija. Upravo se u dimenzijama značajno razlikuju komercijalno dostupni IMU-ovi od prototipa koje izrađuju znanstveni timovi. Istražni prototipovi su u pravilu manjih dimenzija i lakši od komercijalnih. Međutim, za preciznu obradu podataka i procjenu stanja u dinamičnim aplikacijama potrebna je protočnost velike količine podataka što je ograničeno dimenzijama pojedinih komponenti (Höflinger i dr., 2012).

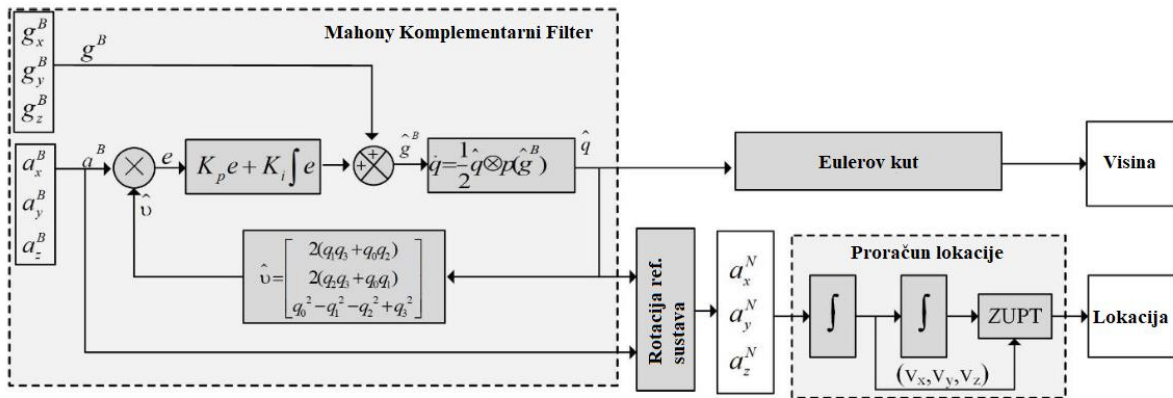
4.1. Način rada lokalizacije pomoću IMU-a

Postoje mnoge izvedbe IMU-a ovisno o zadaći sustava koji se razvija. Primjerice, Höflinger i dr. razvili su sustav lokalizacije koji se temelji na kombiniranoj primjeni IMU-a i UWB-a (eng. Ultra-wideband). IMU koji su koristili sastoji se od triaksijalnog akcelometra, triaksijalnog žiroskopa i triaksijalnog magnetometra. Svrha njihovog sustava je vjerodostojna navigacija pripadnika hitnih službi. S druge strane, autori Lim i dr. razvili su sustav koji se

sastoji od akcelometra, dva žiroskopa i triaksijalnog magnetnog senzora pomoću kojega mogu pratiti svih šest stupnjeva slobodnog kretanja (eng. degrees of freedom - DOF).

Neovisno o funkciji, svi INS sustavi temelje se na istoj tehnologiji stoga su im način rada i problemi s kojima se suočavaju jako slični. Općenito, kod INS-a parametri koji se koriste za navigaciju, odnosno pozicija u prostoru i brzina procjenjuju se rješavanjem inercijskih navigacijskih jednadžbi kroz integraciju vanjskog ubrzanja. Iz tog je razloga bitno da akcelometri precizno procjenjuju vanjsko ubrzanje tijekom gibanja. To se postiže oduzimanjem gravitacijskog ubrzanja od izmjerenog ubrzanja. Također, bitno je da su akcelometri i žiroskopi dobro kalibrirani kako bi se umanjile greške (Zihajehzadeh i dr., 2015). Akcelometar, uz magnetometar, ima i ulogu određivanja orijentacije krutog tijela u stanju mirovanja. Uloga žiroskopa je mjerenje kutne brzine koja integracijom pruža potrebne informacije za proračun orijentacije tijela. Greške uzrokovane posmakom i veličinskim faktorima kontinuirano se korigiraju razlikom integriranih vrijednosti dobivenih mjerenjem pomoću žiroskopa, te akcelometra i magnetometra. Ti proračunati podaci koriste se za korigiranje grešaka koje nastaju u stanju gibanja (Lim i dr., 2008).

Ako se podaci proračunati načinom koji je gore opisan uzmu kao ulazni i provuku kod kompleksne algoritme i/ili filtere, postiže se lokalizacija koja daje podatak o visini i lokaciji promatranog objekta. Slika 4-1 prikazuje shematski primjer proračuna, odnosno procjene lokacije i visine promatranog objekta. Uzete su u obzir prednosti akcelometra u statičnim uvjetima i žiroskopa u dinamičkim uvjetima. Vrijednosti mjerenja triaksijalnog akcelometra prikazane su oznakom a^B , a vrijednosti mjerenja žiroskopa prikazane su oznakom g^B . Mahonyjev filter u sustavu sa slike 4-1 služi za poništenje šumova i proračun visine objekata u stanju gibanja, te proračun visine kvaterniona za rotaciju referentnog sustava kako bi se ostvario kontinuirani stav za procjenu pomaka (Zhang i dr., 2020).



Slika 4-1 Shematski dijagram IMU-ove procjene visine i lokacije (Zhang i dr. 2020)

Jedan od većih problema kod rada IMU-a i općenito INS-a su greške pri mjerenju. Na manjim udaljenostima te greške nemaju velik utjecaj na lokaciju, ali se kumulativno zbrajaju (Höflinger i dr., 2012). To implicira da na većim udaljenostima pri neprekidnom radu INS-a može doći do grešaka koje bi značajno utjecale na funkcionalnost sustava kao što je SGS.

4.2. INS u rudarstvu

Unapređenjem postojećih tehnologija i razvojem novih metoda, početkom 21. stoljeća u Australiji je došlo do naglog rasta proizvodnje ugljena iz podzemnih rudnika. Međutim, većina unapređenja je utjecala na brzinu razvoja otkopnog čela, ali ne i na brzinu razvoja pristupnih i bočnih hodnika. Iz toga je razloga Australsko Udruženje za razvoj u eksploataciji ugljena (ACARP) osnovalo grupu za razvoj pristupnih hodnika i puteva (RDTG) (Dunn i dr., 2012).

Cilj RDTG-a bio je istraživanje i razvoj strategije za četiri velike tehnološke kategorije (Dunn i dr., 2020):

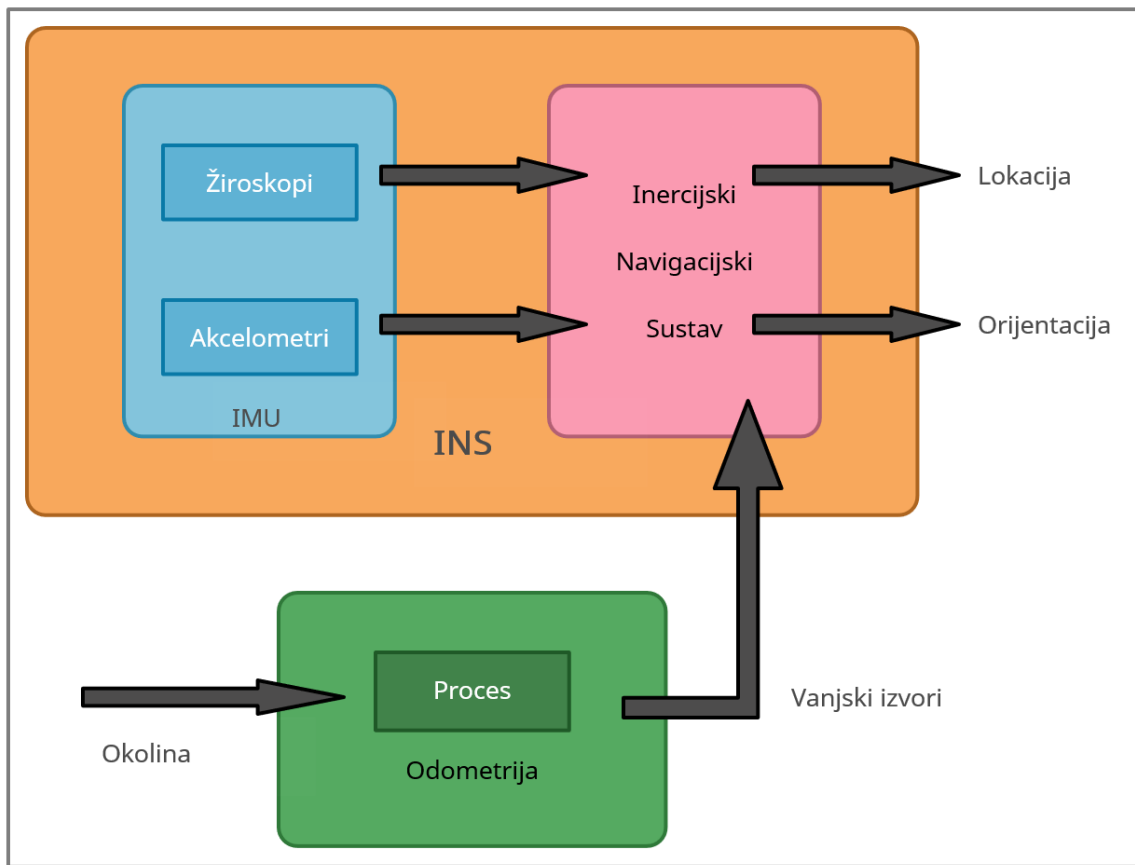
- autonomni stroj kontinuiranog načina rada (CM) koji se daljinski nadzire
- automatizirana ugradnja krovnih i bočnih potpora
- kontinuirani transport i izvoz
- integrirane panelne usluge (eng. Integralservices)

Kao dio ove strategije, odlučilo se ići u razvoj CM-a prikazanog na slici 4-2. Cijeli projekt i sve njegove stavke zovu se CM2010 u literaturi. Cilj ovog trogodišnjeg projekta bio je razviti funkciju samostalnog upravljanja koja bi omogućila CM-u da održava 3D poziciju, azimut, horizont i razinu kvalitete unutar horizontalnih slojeva, sve pod daljinskim nadzorom.



Slika 4-2 Model CM-a na kojem se razvijao INS (Dunn i dr., 2012)

INS sustav koji su Dunn i dr. razvili za CM sastoji se od akcelerometra i žiroskopa. Najveći problem s kojim su se susreli je način obrade podataka koje IMU pruža. Naime, s obzirom da se ti podaci obrađuju numeričkom integracijom, greške koje nastaju se eksponencijalno akumuliraju. Članovi RDTG-a odlučili su ovaj problem riješiti uvrštavanjem eksternih, vanjskih podataka kao korekcijskih vrijednosti. Slika 4-3 prikazuje blok dijagram koji prikazuje vezu između IMU senzora i pomoćnih izvora koji se koriste za proračune (Dunn i dr., 2012).



Slika 4-3 Blok dijagram veze između IMU senzora i vanjskih izvora (Dunn i dr., 2012)

Za potrebe eksperimenta, članovi RDTG-a su koristili mobilnu platformu „Pheonix“. Pheonix je daljinski kontrolirano vozilo s mogućnošću skretanja na mjestu (eng. skid-steer). Ekstenzivna testiranja INS sustava su provedena pomoću Pheonixa. Analizom rezultata zaključilo se da je INS pouzdan sustav za autonomne operacije u uvjetima kao što su podzemni rudnici ugljena. Rezultati su prikazali da se 2D pozicija pomoću ovakvog sustava postiže na preciznost od decimetra unutar dometa od jednog kilometra, uključujući oštre zavoje, vožnju unazad i bez značajnih posljedica uzrokovanih vibracijama (Dunn i dr., 2012).

5. PRIMJENA RFID I INS TEHNOLOGIJA U SGS-U

Kako je ranije u radu opisano, nastavno na rad od Brozović i dr., cilj je da se SGS-u kao sekundarnu funkciju osigura praćenje lokacije u stvarnom vremenu. Pregledom dostupne literature odlučeno je usmjeriti razvoj prema integriranom sustavu koji koristi RFID i INS tehnologije. Obje tehnologije imaju prednosti i nedostatke u pogledu primjene na SGS, te su one prikazane na tablici 5-1.

Tablica 5-1 Opis funkcija RFID-a i INS-a u sklopu SGS-a

Tehnologija	Prednosti	Nedostatci	Primjena na SGS
RFID	• mogući različiti pristupi, • mogućnost praćenja u stvarnom vremenu, • kratko vrijeme povrata signala, • relativno dobra preciznost na velikim udaljenostima, • mogućnost za žičnu i bežičnu izvedbu, • primjenjivo u više svrha	• visoka cijena za veće podzemne objekte, • osjetljivost na smetnje kao što su voda, metalne konstrukcije i sl., • slabljenje signala ukoliko prolazi kroz stijensku masu	• određivanje grube lokacije spasioca postavljanjem čitača na ključne točke, • praćenje zadnje poznate lokacije potencijalno unesrećene osobe
INS	• moguće razne izvedbe • odabir radnih komponenti prilagodljiv željenoj funkciji • fiksna cijena po jedinici	• eksponencijalno rastuće kumulativne greške pri mjerenju • potreba za zahtjevnim algoritmima koji obrađuju mjerene podatke • potreba za kalibracijom komponenti	• određivanje točne lokacije između dva RFID čitača • praćenje određene lokacije u stvarnom vremenu

Samostalna upotreba RFID-a je opcija, ali gustoća raspoređenih čitača bi vjerojatno prekoračila rentabilnost cijelog sustava. Također, takvo rješenje zahtijevalo bi korištenje UHF čitača, koji su daleko skuplji od onih koji rade na nižim frekvencijama. Osim toga, zakonska regulativa pojedine zemlje diktirala bi dozvoljenu radnu frekvenciju, što bi značilo da bi se za svaku zemlju trebale proizvoditi zasebne jedinice. To bi sa sobom dovelo do dodatnih problema jer bi se vjerojatno značajno povećala cijena proizvodnje, što opet ultimativno povećava i cijene krajnjeg proizvoda i usluge.

S druge strane, samostalna primjena INS-a nije opcija s obzirom da njegova pouzdanost značajno pada s povećanjem udaljenosti. Nažalost rudnici i većina podzemnih objekata gdje je SGS primjenjiv protežu se kilometrima, a ponekad i stotinama kilometara.

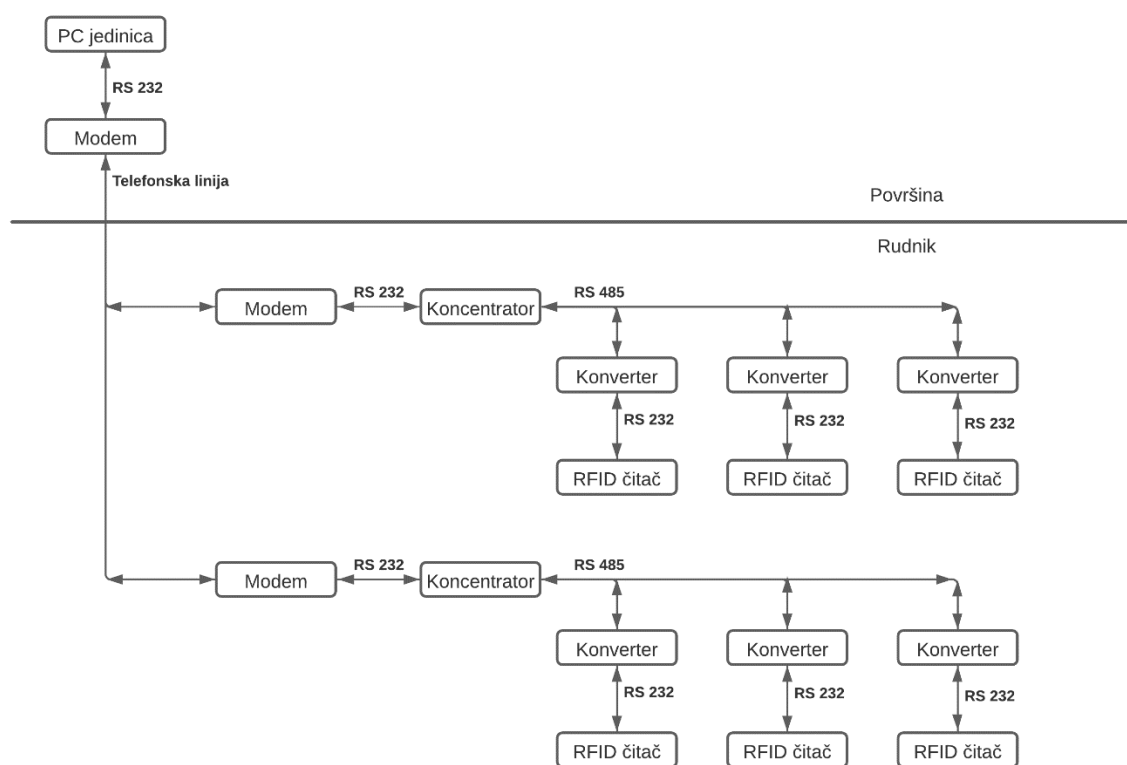
5.1. Opis integriranog sustava za praćenje lokacije

Kako je prethodno već opisano, zasebno RFID i INS tehnologije nemaju budućnost pri navigaciji unutar problematike SGS-a. U sljedećim podpoglavljima opisan su varijante RFID-a i INS-a koje se predlažu kako bi se postigla maksimalna preciznost pri određivanju lokacije. Međutim, one nisu definitivne ukoliko kasniji praktični eksperimenti na prototipu pokažu da ima prostora za poboljšanja.

5.1.1. RFID u SGS-u

RFID će služiti za grubo određivanje lokacije. Prolaskom pored čitača s odašiljačem koji će se nalaziti na opremi spasioca, doći će do slanja signala, odnosno tzv. javljanja (eng. „*pinga*“) lokacije. Raspored čitača ne može unaprijed biti određen jer ovisi o dometu unutar kojeg INS relativno precizno može pratiti lokaciju uređaja. S obzirom da se RFID neće koristiti za precizno praćenje lokacije, dovoljno je samo da razmak između dva čitača bude jednak dometu pouzdanosti INS-a. Prije nego li se odabere točna varijanta RFID-a koja će se koristiti, potrebno je prvo razviti INS.

Za samu instalaciju, predlaže se korištenje postojeće telefonske mreže ukoliko takva u rudniku postoji. Bežična varijanta je također opcija, ali njena pouzdanost tijekom havarija je upitna, te je zato potrebno tu mogućnost dodatno istražiti. Slika 5-1 prikazuje shematski prikaz takve mreže koju su autori Hon i dr. opisali za rudnike ugljena.



Slika 5-1 Topologija RFID mreže u rudniku ugljena (Hon i dr., 2015)

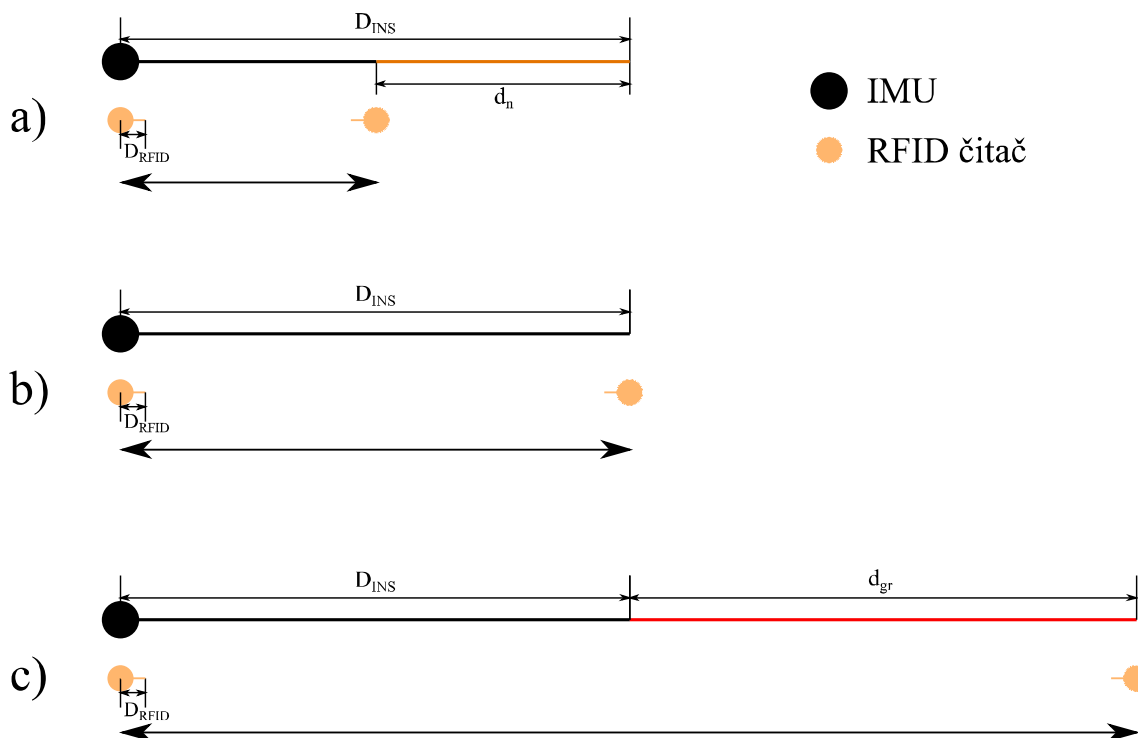
Kućišta u koje bi se postavili čitači moraju biti otporna na prašinu, vodu, udarce i vibracije (Hon i dr., 2015). Kablovi koji povezuju čitače s površinom trebaju biti postavljeni na mjesta gdje je mogućnost oštećenja minimalna, čak i kod primjerice urušavanja. Funkcija čitača je dvostruka:

- 1) slati kroz žice informaciju o lokaciji do računala na površinu
- 2) poslati natrag informaciju odašiljaču o lokaciji uređaja, odnosno korisnika

Napajanje za cijeli sustav osiguralo bi se kroz žice, ali kako bi se postigla funkcija 2) potrebno je osigurati i napajanje za čitače ukoliko dođe do prekida kontakta s površinom kod

urušavanja. Iz tog razloga kućište u kojem se nalazi čitač treba imati i ugrađenu bateriju. Trajanje baterije predlaže se na 72 h, ali to može varirati ovisno o potrošnji čitača.

Razmak između čitača, kao što je već ranije objašnjeno, ne može se odrediti bez ekstenzivnih ispitivanja prototipa, ali se mogu definirati uvjeti. Na slici 5-2 prikazana je usporedba različitih razmaka čitača s pretpostavkom da je domet preciznosti INS-a 50 m.

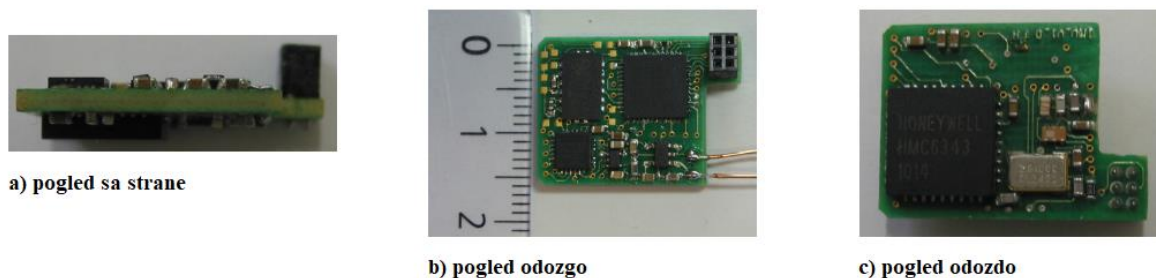


Slika 5-2 Potreban razmak RFID čitača

Na slici 5-2 D_{INS} predstavlja domet pri kojem je praćenje lokacije pouzdano (uvedena pretpostavka od 50 m). Iz slike je vidljivo da taj domet određuje razmak RFID čitača. Uvjet da bi ovo vrijedilo je aktivacija INS-a unutar dometa čitača, koji je prikazan pod D_{RFID} . Pretpostavka za D_{RFID} je 2,5 m. Ukoliko se odabere razmak od 25 m (slika 5-2a) između čitača, vidljivo je da je pola dometa INS-a neiskorišteno (d_n), što je s nepovoljno s gledišta cijene sustava. Pri razmaku od 100 m (slika 5-2c), dolazi se do problema kumulativnih greški INS-a (d_{gr}) koje rastu eksponencijalno. Upravo zato se mora težiti da se razmak čitača i domet INS-a podudaraju, odnosno u ovom slučaju da pretpostavljeni D_{INS} i razmak čitača budu 50 m (slika 5-2b).

5.1.2. INS u SGS-u

Pri dizajnu inercijskog sustava navigacije koji je primjenjiv u SGS-u treba imati na umu dimenzije uređaja. U najboljem slučaju, komponente IMU-a moći će se postaviti u kućište prototipa uređaja. Ukoliko broj i dimenzija komponenti budu preveliki za smještaj unutar kućišta, treba napraviti novu jedinicu koja se može objesiti primjerice na pojas oko struka spasioca. Autori Höflinger i dr. razvili su mikro IMU čije su dimenzije 18 mm x 16 mm x 4 mm, volumena od 1,2 cm³. Slika 5-3 prikazuje njihovu inačicu mikro IMU-a. Za komponente iskoristili su po jedan akcelerometar, žiroskop i magnetometar. Tablica 5-2 prikazuje specifikacije navedenih komponenti.



Slika 5-3 Mikro IMU (Höflinger i dr., 2012)

Akcelerometar koji su iskoristili bio je niskonaponski triaksijalni „Freescale Semiconductor MMA845Q“ s digitalnom rezolucijom od 14 bitova. Ovaj čip omogućava biranje mjernog područja akceleracije (g-ova), s opcijama ± 2 g, ± 4 g ili ± 8 g. Prema tome, moguće osjetljivosti su 122 μ g, 244 μ g ili 488 μ g. Senzori se također mogu podesiti da funkcioniraju kao filteri za smanjenje aliasinga i šumova.

Žiroskop je digitalni triaksijalni „InventSense ITG3200“ koji se koristi za mjerenje kutnih vrijednosti. Ovaj MEMS žiroskop ima 16-bitnu rezoluciju i nekoliko internih filtera. Senzor ima mjerno područje od 2000°/s i maksimalnu osjetljivost od 0,061°/sec.

Magnetometar je digitalni „Honeywell HMC6343“ koji se koristi za mjerenje geomagnetskog polja. Ima triaksijalni magnetootporni senzor s rezolucijom od 12 bitova.(Höflinger i dr., 2012).

Tablica 5-2 Specifikacije komponenti mikro IMU-a (Höflinger i dr., 2012)

Vrsta senzora	Mjerno područje	Osjetljivost	Maksimalna brzina uzorkovanja	Digitalna rezolucija
Akcelerometar MMA7451Q	± 4 g	0,003 g	800 uzoraka/s	14 bitna
Žiroskop ITG3200	2000 °/s	0,061 °/s	8000 uzoraka/s	16 bitna
Magnetometar HMC6343	± 1 Gs	0,1°	10 uzoraka/s	12 bitna

Komponente poput ovih moguće je potencijalno implementirati i u postojeći prototip SGS-a koji se sastoji od Raspberry Pi-a. Zapravo je preporučljivo prije izrade novog prototipa kalibrirati i optimizirati rad komponenti IMU-a.

Kalibracija IMU-a općenito je jedna od bitnijih stavki razvoja INS-a. Naime, tablica 5-3 prikazuje rezultate i usporedbu greški pri mjerenju svih triju komponenti Micro IMU-a koji su razvili Höflinger i drugi. U tablici 5-3 vidljivo je da su greške pri mjerenju akcelerometra i magnetometra manje za 3,5 do 3,7 puta, dok je greška pri mjerenju žiroskopa smanjena za čak 170 puta.

Tablica 5-3 Usporedba nekalibriranih i kalibriranih senzora (Höflinger i dr., 2012)

	Žiroskop	Akcelerometar	Magnetometar
Nekalibriran senzor	25,64 °/sec	0,052 m/s ²	14,69 nT
Kalibriran senzor	0,15 °/sec	0,015 m/s ²	3,90 nT
Odnos nekalibrirane i kalibrirane vrijednosti	170,93	3,47	3,77

Cilj pri izradi idućeg prototipa ili nadogradnji postojećeg biti će preciznost INS-a od 1 m.

5.2. Unapređenje softvera SGS-a

Općenito gledano, softver SGS-a treba unaprijediti u više područja, ali ovo će se podpoglavlje osvrnuti na unapređenja vezana za praćenje lokacije. S gledišta *back-end* razvoja, moraju se implementirati sljedeće funkcije:

- a) minimalna brzina osvježavanja zaslona od 1 FPS
- b) obrada signala između RFID čitača i odašiljača
- c) pravovremena aktivacija i osvježanje INS-a
- d) trenutno preračunavanje mjerenja IMU-a pomoću algoritma
- e) korekcija mjerenja IMU-a
- f) korekcija lokacije na temelju definiranih hodnika podzemnog objekta

a) Minimalna brzina osvježavanja (eng. refresh rate) zaslona mora biti dovoljno kratka da u gotovo svakom trenutku spasilac, odnosno korisnik može provjeriti svoju lokaciju u podzemnom objektu. Naravno, težiti će se da brzina osvježavanja zaslona bude puno veća od 1 FPS, ali bi čak i ovako nizak FPS trebao biti dostatan za uvjete spašavanja. S obzirom na vidljivost u rudniku i potrebnu koncentraciju na zadatke akcije spašavanja, dovoljno je da spasilac može povremeno provjeriti svoju lokaciju. Najbitnije je znati lokaciju i imati daljnje upute u trenutku kada se spasilačka grupa nalazi na raskrižju podzemnog objekta.

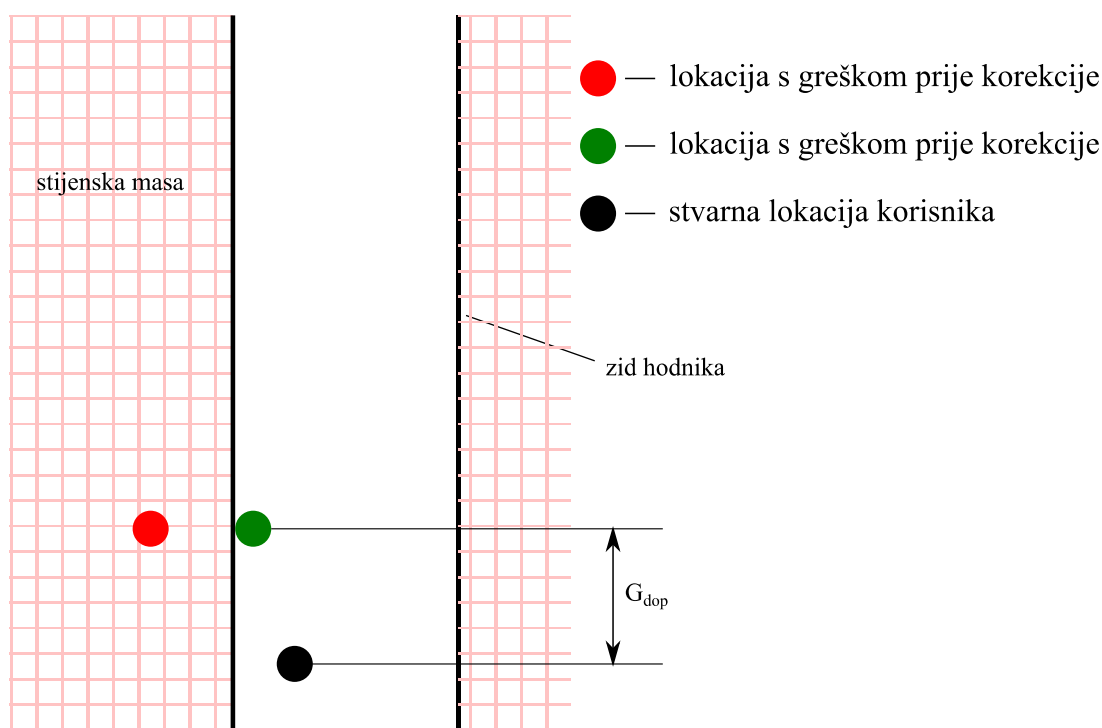
b) Obradu signala ovog tipa RFID sustava generalno odrađuje računalo koje je „posljednja“ postaja za informacije. Osim računala na površini, istu mogućnost mora imati SGS ukoliko dođe do prekida linije RFID sustava do površine s obzirom da se informacije prvo moraju pružati korisniku, a sekundarno površini.

c) Kao što je opisano u ranijim poglavljima, trenutak aktivacije INS-a mora se dogoditi dok je uređaj u dometu RFID čitača. Zadaća SGS-a je osigurati da se to dogodi. Točnije, softver mora pomoću ugrađene funkcije imati mogućnost aktivirati, deaktivirati i resetirati INS u trenutku kada uređaj dođe u kontakt s RFID čitačem. Ova funkcionalnost spriječiti će kumulaciju greški IMU-a jer će radni hod biti ograničen na razmak između dva čitača.

d) Algoritam za preračunavanje mjerenih podataka treba u kratkom vremenskom roku integrirati mjerenja senzora IMU-a kako bi se mogli definirati smjer, pomak i visina uređaja, odnosno korisnika. S obzirom na problematiku koju SGS pokušava riješiti, ovo preračunavanje mora se odvijati unutar samog uređaja, a ne na površini.

e) Korekcija mjerenja IMU-a mora se iz istih razloga kao i kod algoritma za preračunavanje odvijati u uređaju na korisniku. Preduvjet za pouzdanost određivanja lokacije pomoću IMU-a i INS-a općenito ovisi o točnosti podataka. Ta točnost postiže se kalibracijom senzora prije korištenja, te korekcijom mjerenja u stvarnom vremenu tijekom korištenja.

f) Dodatne se korekcije mogu obaviti ukoliko se definiraju granice podzemnog objekta. Ukoliko se unaprijed definiraju granice, te se onemogućí lokalizacija izvan tih granica, točnije u stijensku masu, potencijalno se mogu barem djelomično eliminirati greške po određenim osima u odnosu na korisnikovo kretanje. Slika 5-4 prikazuje skicu takve korekcije lokacije s obzirom na granice hodnika. Oznaka G_{dop} predstavlja dopuštenu grešku između lokacije na uređaju i stvarne lokacije korisnika.



Slika 5-4 Korekcija greške lokacije uređaja s obzirom na granice hodnika

6. ZAKLJUČAK

RFID i INS su tehnologije s mnogim primjenama, posebice kod određivanja i praćenja lokacije. Predložen je integrirani sustav ovih tehnologija koji predstavlja veliki potencijal u rješavanju problematike praćenja lokacije spasioca tijekom akcije spašavanja. Korištenjem RFID sustava za grubu lokalizaciju i INS-a za preciznu lokalizaciju na manjim udaljenostima između RFID čitača, ovaj integrirani sustav trebao bi omogućiti praćenje lokacije korisnika u stvarnom vremenu i istovremeno slati tu informaciju do računala na površinu.

Za uspješnu realizaciju ove nadogradnje Subterranean Guidance Systema (SGS-a), potrebno je razviti sustav opisan u ovom radu imajući na umu limite i probleme okruženja u kojem će on biti primijenjen.

Radi potvrde teorije iza ovoga rada potrebna su ekstenzivna ispitivanja na prototipu kako bi se mogao u potpunosti optimizirati. Prototip koji će se koristiti može biti nadogradnja postojećeg SGS-a ili potpuno nova inačica konstruirana da zadovolji sve potrebe ne samo ovog aspekta sustava, već i svih ostalih.

Može se zaključiti da će SGS biti kvalitetna zamjena dosadašnjih sustava navigacije i „praćenja“ lokacije prvenstveno u kriznim situacijama, a po potrebi i ostalim.

7. LITERATURA

Članci, radovi, knjige, poglavlja iz knjiga

APARTNA R., RUCHITHA H. T. S., PRANAVI N., KESKAR A. G., 2020., *IMU based Tracking of a Person using Nonlinear Autoregressive Exogenous (NARX) Algorithm in GPS-denied Areas*, Visvesvaraya National Institute of Technology, Nagpur, Indija

BEAZLEY D., JONES B. K., 2013., *Python Cookbook*, Third Edition, O'Reilly Media, Inc., Sebastopol, Kalifornija, Sjedinjene Američke Države

BROZOVIĆ J., ČESIĆ B., WEISER K., 2020., *Razvoj uređaja za podzemnu navigaciju pri spašavanju (Development of Subterranean Guidance System – SGS)*, Rad za rektorovu nagradu ak. god. 2019./20., Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-Geološko-Naftni Fakultet, Zagreb, Hrvatska

DOWNEY, A., 2015., *Think Python: How to Think Like a Computer Scientist*, 2nd Edition, Version 2.4.0., Green Tea Press, Needham, Massachusetts, Sjedinjene Američke Države

DUNN M. T., THOMPSON J. P., REID P. B., REID D. C., 2012., *High Accuracy Inertial Navigation for underground Mining Machinery*, CISRO Earth Science and Resource Engineering, Queensland Centre for Advanced Technologies, Pullenvale, Queensland, Australija, 8th IEEE International Conference on Automation Science and Engineering, August 20-24, Seoul, Koreja, str. 1179-1183

HÖFLINGER F., ZHANG R., REINDL L. M., MÜLLER J., BURGARD W., 2012., *A Wireless Micro Inertial Measurement Unit (IMU)*, University of Feriburg, Njemačka

HON V., DOSTAL M., SLANINA Z., 2015., *The Use of RFID Technology in Mines for Identification and Localization of Persons*, Ostrava, Czech Republic, Technical University

of Ostrava, Faculty of Electrical Engineering and Computer Science, ZAM-SERVIS s.r.o., Czech Republic

HRUŠKA M., 2018., *Osnove programiranja (Python)*, Sveučilište u Zagrebu, Sveučilišni računski centar, Zagreb

JECHLITSCHKE C., 2010., *A survey paper on Radio Frequency Identification (RFID) trends*, Washington University, St. Louis, Sjedinjene Američke Države

JUNG K., LEE S., 2015., *A systematic review of RFID applications and diffusion: key areas and public policy issues*, Journal of Open Innovation: Technology, Market and Complexity, Seoul National University, Seoul, Republika Koreja

LIM K. Y., GOH F. Y. K., DONG W., NGUYEN K. D., CHEN I-M. YEO S. H. DUH H. B. L., KIM C. G., 2008., *A Wearable, Self-Calibrating, Wireless Sensor Network for Body Motion processing*, IEEE International Conference on Robotics and Automation, Pasadena, CA, SAD, May 19-23, str. 1017-1022

MISHRA P.K., STEWART R. F., BOLIC M., YAGOUB M. C. E., 2014., *RFID in Undergroun-Mining Service Applications*, Pervasive Computing, January – March, str. 72 – 79, IEEE CS 1536-1268/14

REHMAN A. U., AWUAH-OFFEI K., BAKER D.A., BRISTOW D. 2019., *Emergency evacuation guidance system for underground miners*, Conference paper, SME Annual Meeting, Denver, Colorado, Sjedinjene Američke Države, Feb. 24-27

SINGH D. R., MISHRA K. A., 2016., *Review of IT Enables Technologies in Indian Mining Industry for Improved Productivity & Safety*, Department of Mining Engineering, Indian School of Mines, Dhanbad, Jharkhand, Indija

SNIEDOVICH, M., 2006., *Dijkstra's algorithm revisited: the dynamic programming connexion*, Melbourne, Australia, The University of Melbourne, Department of Mathematics and Statistics

WAMBA FOSSO S., ANAND A., CARTER L., 2013., *RFID Applications, Issues, Methods and Theory: a Review of the AIS Basked of TOP journals*, Procedia Technology 9, str. 421 – 430

ZHANG H., ZHANG Z., GAO N., XIAO Y., MENG Z., LI Z., 2020., *Cost-Effective Wearable Indoor Localization and Motion Analysis via the Integration of UWB and IMU*, članak iz Sensors, 2020, 30, 344

ZIHAJEHZADEH S., YOON P. K., KANG B-S., PARK E. J., 2015., *UWB-Aided Inertial Motion Capture for Lower Body 3-D Dynamic Activity and Trajectory Tracking*, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 64, No. 12, December edition, str. 3577-3587

www izvori

FRIELDOS D., 2008., *Xstrata Mines RFID's Benefits*, RFID Journal,
URL: <https://www.rfidjournal.com/xstrata-mines-rfids-benefits>

FRIELDOS D., 2018., *Indian Mine Monitors Workers and Toxic Gases*, studio98test.com
URL: <https://www.studio98test.com/ahmad-test/indian-mine-monitors-workers-and-toxic-gases>

IT Law Wiki, 2020., URL: https://itlaw.wikia.org/wiki/RFID_tag

Joy-IT, 2020., URL: <https://joy-it.net/en/>

Raspberry Pi Foundation, 2020., URL: <https://www.raspberrypi.org/>