

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

ხელნაწერის უფლებით

დავითი ჯიჯურიძე

უსადენო სენსორული ქსელის ოპტიმიზაცია მისი უმტყუვნო

მუშაობის უზრუნველსაყოფად

დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად

წარდგენილი დისერტაციის

ავტორეფერატი

სადოქტორო პროგრამა: ციფრული სატელეკომუნიკაციო ტექნოლოგიები

შიფრი: 0714

თბილისი

2021 წელი

სამუშაო შესრულებულია საქართველოს ტექნიკურ უნივერსიტეტში  
ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის ფაკულტეტი  
ტელეკომუნიკაციის დეპარტამენტი

ხელმძღვანელი: პროფესორი ჯ. ბერიძე

რეცენზენტები:

დაცვა შედგება 2021 წლის "-----" -----, ----- საათზე  
საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ენერგეტიკისა და  
ტელეკომუნიკაციის ფაკულტეტის სადისერტაციო საბჭოს კოლეგიის  
სხდომაზე, კორპუსი VIII, აუდიტორია  
მისამართი: 0166, თბილისი, კოსტავას 77.

დისერტაციის გაცნობა შეიძლება სტუ-ის ბიბლიოთეკაში,  
ხოლო ავტორეფერატისა - ფაკულტეტის ვებგვერდზე

სადისერტაციო საბჭოს მდივანი,  
ასოცირებული პროფესორი

გ. გიგინეიშვილი

## სამუშაოს ზოგადი დახასიათება

*პრობლემის აქტუალურობა.* უსადენო სენსორული ქსელი - უსქ (WSN-Wireless Sensor Network) წარმოადგენს ტელეკომუნიკაციის თანამედროვე ტექნოლოგიების განვითარების ერთ-ერთ ყველაზე პერსპექტიულ მიმართულებას. მისი გამოყენების პერსპექტივა გამოიწვია ინტერნეტის, კავშირგაბმულობისა და ინფორმაციული ტექნოლოგიების განვითარებამ და მათმა დაახლოებამ. გზა გაუხსნა მომავლის ისეთი ტექნოლოგიებს განვითარებას რომლებიც თავისთავში გულისხმობს ახალი სახის სენსორული ქსელის შექმნასა და მათ განვითარებას. სენსორულმა მოწყობილობებმა უნდა შეემღონ დიდი მოცულობის ინფორმაციის გადაცემა და მიღება, მაღალი ხარისხითა და სიზუსტით. ტექნოლოგიური პროგრესის ბოლო მიღწევებმა შესაძლებელი გახადა შექმნილიყო იაფი მინიატურული გამომთვლელები მცირე ენერგო-მოთხოვნილებით, აღჭურვილები რადიო მიმღებ-გადამცემებით, რომელთაც შეუძლიათ როგორც ლოკალური კავშირი ერთმანეთთან, ასევე გლობალური კავშირი, გარე მოწყობილობებთან უსადენო კავშირით.

სერნორების მუშაობის განვითარებამ ცხადყო, რომ მოთხოვნები იზრდება როგორც მათი ზომები შემცირებისაკენ, ასევე მათი მუშაობისა და ეფექტურობის გახანგრძლივებისაკენ.

უახლოეს მომავალში ამ სახის ქსელები მნიშვნელოვან როლს შეასრულებენ ჩვენს ცხოვრებაში, იგეიმება მათი რიცხვის რამდენიმე მილიარდამდე გაზრდა. ტექნოლოგია, რომელიც განკუთვნილია „მართვისა და აღქმისათვის“ აქვს დიდი პოტენციალი განვითარებისა და წინსვლისთვის, რადგან მათი გამოყენება შესაძლებელია არა მხოლოდ მეცნიერებასა და ინჟინერიაში არამედ სხვა ყოველდღიურ საყოფაცხოვრებო საქმიანობაშიც,

როგორც მაგალითად: გარემოსა და ჯანმრთელობის დაცვაში, კვების ტექნოლოგიეში, ცხოვრების ხარისხის გასაუმჯობესების სფეროში და ა.შ.

სენსორების ღირებულების შემცირება და მათი ხარისხის ზრდა გამოიწვევს მრეწველობისა და ბიზნესის განვითარებას რადგან ამ სახის მოწყობილობებს მომხმარებლისთვის უამრავი სარგებლის მოტანა შეუძლიათ.

სენსორული ქსელების ელემენტები ამჟამად წარმოდგენილია მრავალი მწარმოებლების მიერ, რასაც მოჰყვა სხვადასხვაგვარი ინდუსტრიული სტანდარტების გამოჩენა, რომლებიც ვერ უზრუნველყოფენ ურთიერთქმედებას სხვადასხვა მწარმოებლების მოწყობილობებს შორის. სენსორულ ქსელებში ენერჯის მიმოცვლა და მოხმარება ძირითადად დამოკიდებულია პროტოკოლების მუშაობაზე რომლებსაც უშუალოდ ეს მოწყობილობები იყენებენ. ძირითადი სამუშაოები სენსორულ ქსელებში გამოყენებული პროტოკოლების სტანდარტიზაციის სფეროში ტარდება ელექტროტექნიკისა და ელექტრონიკის ინჟინრების ინსტიტუტის (IEEE), ტელეკომუნიკაციის საერთაშორისო კავშირის (ITU), სტანდარტიზაციის საერთაშორისო ორგანიზაციის - ISO მიერ.

სენსორული ქსელი შედგება ასობით ათასი მინიატურული მოწყობილობისაგან, რომლებიც ერთმანეთს უკავშირდებიან შეზღუდული ინტეგრირებული კვების წყაროს საშუალებით. ეს მოწყობილობები განაწილებულია რეალურ გარემოში, გარემოდან შეგროვებული მონაცემებს პირდაპირ ცენტრალუს სადგურზე (BS) აგზავნიან. ცენტრალური კვანძი (BS) წარმოადგენს მოწყობილობას რომელიც მართავს, მონიტორინგს უწევს და უზრუნველყოფს ინფორმაციის შეგროვებას სენსორული კვანძებიდან. ეს მოწყობილობა აანალიზებს მიღებულ მონაცემთა შორის მსგავსებას, რომელსაც იყენებს დაქვემდებარებული კვანძების მუშაობის სამართავად.

ენერგო-ეფექტური მუშაობა უსქ-ის უმთავრესი პრობლემაა, რადგან ეს მოწყობილობები შემუშავებულია მრავალწლიანი არამომსახურებადი თვითორგანიზებადი მუშაობისთვის. ენერგო მომსახურების სირთულეს ასევე განაპირობებს სენსორული კვანძების განლაგების არეალი, რომელიც ზოგადად შეიძლება მიუვალი და მიუდგომელი გარემო პირობები იყოს, სადაც სენსორული კვანძებისთვის ელემენტის გამოცვლა შეუძლებელი იქნება. სწორედ ამიტომ ენერგო მომარაგება, კერძოდ მკვებავი ელემენტი უსადენო სენსორული ქსელების უმნიშვნელოვანესი შედაგენელი კომპონენტია.

უსადენო ქსელებში, ენერგიის ძირითადი დანახარჯი ინფორმაციის მიმოცვლაზე მოდის, ამის შესამცირებლად საჭიროა ენერგიის ოპტიმიზირების პროტოკოლების გამოყენება.

OSI ზოგადი კავშირის მოდელი სრულად ვერ ერგება ამ ტიპის ქსელის ორგანიზებას. სხვა ტიპის მოდელებიც ასევე არასრულ გამოყენებას პოულობენ ამ სფეროში, რომლებიც სენსორულ ქსელში მოიცავენ პროტოკოლების შემდეგ სტეკებს: ფიზიკურ დონეს, MAC დონეს, ქსელის დონეს, სატრანსპორტო დონეს და პროგრამულ (სააპლიკაციო) დონეს, ამასთან ასევე მოიცავენ ენერგეტიკული რესურსების მართვის დონეს, მობილურობის მართვის დონეს (უსადენო მობილური სენსორული კვანძების შემთხვევაში) და ამოცანების შესრულებისა და დაგეგმარები ფუნქციებს. სწორედ ამიტომ უნივერსალურად არც ერთი მოდელი არ ერგება.

მიუხედავად იმისა, რომ სენსორული კვანძის დახასიათება როდესაც იგი მუშა ან უფუნქციო მდგომარეობაშია თეორიულად მარტივად და ნათლად განიმარტება, ცდების შედეგებიდან დასტურდება, რომ ამის გაკეთება პრაქტიკაში მარტივი აღარ არის. სხვადასხვა გამოთვლითი ხელსაწყოების დახმარებით გაანალიზდა, რომ გარკვეული სიძნელეები არსებობს

სენსორული კვანძის განმარტებასთან რომელიც ასახავს ფუნქციონირების შეწყვეტას. აქ იგულისხმება გარემოება როდესაც ყველა ტექნიკური პარამეტრის მიხედვით სენსორული კვანძი არ უნდა მუშაობდეს და უნდა იყოს ე.წ. „სიკვდილის სტადიაში“, მაგრამ ექსპერიმენტული სამუშაოების შედეგად დგინდება, რომ სენსორული კვანძების უმეტესობა მაინც განაგრძობენ ფუნქციონირებას თუმცა არა ნორმალური, გამართული რეჟიმის ფარგლებში.

ნაშრომის ფაგლებში შევხებით სენსორული მოწყობილობების პროგრამულ და აპარატურულ მხარეს, ექსპერიმენტული სამუშაოებისათვის გამოვიყენებთ სხვადასხვა ხელსაწყოებს. გაზომილ შედეგებს გამოვიყენებთ ენერგო-ეფექტური პროტოკოლის ზოგადი სურათის შესაქმნელად.

*სამუშაოს მიზანი და კვლევის ამოცანები.* დისერტაციის მიზანს წარმოადგენს უსქ-ს მახასიათებლების შესწავლა და განვრცობა თეორიული და ექსპერიმენტული სამუშაოების საფუძველზე, პარამეტრების განსაზღვრა, ქსელის კვანძების ენერგომოხმარების მინიმიზაცია და საბოლოოდ სიცოცხლის დროის გაზრდა, ენერგო ეფექტური პროტოკოლის მოდელის შემუშავება ენერგო რესურსების მაქსიმალური ოპტიმიზირების შედეგად.

დასახული მიზნის მიღწევისათვის გადაწყვეტილი იქნა შემდეგი ამოცანები:

1. უსადენო სენსორული ქსელის არქიტექტურის, პროტოკოლების და დანართების ანალიზი;
2. შესწავლისა და შემუშავებულია სენსორული ქსელის სიცოცხლის დროის განსაზღვრის ალგორითმები;
3. ქსელის ფუნქციონირების პარამეტრებზე დამოკიდებულებით განსაზღვრულია ქსელის სიცოცხლის დრო.

4. ექსპერიმენტულად გაანალიზებულია სენსორული კვანძების მუშაობის ეფექტურობა მათი სხვადასხვა გარემოში ყოფნის დროს;
5. შემოთავაზებულია გადაწყვეტა რომლის მიხედვითაც შესაძლებელია განისაზღვროს ენერგო-ეფექტური პროტოკოლის შემუშავება;
6. შემუშავებულია ენერგო ეფექტური პროტოკოლების პრაქტიკაში გამოყენების მაგალითები;
7. ჩატაერბულია პრაქტიკული ექსპერიმენტული სამუშაო Arduino UNO-ს პლატფორმაზე.

*კვლევის მეთოდოლოგია.* დისერტაციაში განხილულია სენსორული კვანძები მუშაობის უახლესი ალგორითმები, განხილულია მათი გამოყენების ეფექტურობის დადებითი და უარყოფითი მხარეები. შევეხებით მის პროგრამულ მხარეს და მასთან მუშაობის კოდს და მის გამოყენებას დღევანდელ პრაქტიკაში.

*მეცნიერული სიახლე.* მიდგომა დაფუძნებულია Crossbow Mica2 და Arduino UNO-ს პროტოკოლის სტეკის მოდიფიკაციაზე. განხილული და გაზილი იქნება თითოეული პლატფორმის მახასიათებლები და ენერგო დანახარჯები ამათუიმ ამოცანაზე. საბოლოოდ დასკვნს სახით განიხილება ენერგო-ეფექტური პროტოკოლის შემოთავაზება თითოეული პლატფორმისთვის. დისერტაციის ძირითადი შედეგები, რომლებიც წარმოადგენენ მეცნიერულ სიახლეს შემდეგია:

1. დამუშავებულია სენსორული ქსელის სიცოცხლის დროის განსაზღვრის ალგორითმები, რომლებიც საშუალებას იძლევა დაფიქსირდეს ქსელის მწყობრიდან გამოსვლის მომენტი თვითაღდგენის შესაძლებლობის გათვალისწინებით;
2. გასაზღვრულია სენსორული ქსელის სიცოცხლის დროის შეფასების მეთოდოლოგია;

3. შემუშავებულია სენსორული ქსელის სიცოცხლის დროის მაქსიმიზაციის მეთოდი;
4. შექმნილია სენსორული ქსელის ენერგო-ეფექტურობის მოდელი ელექტროენერჯის განაწილების სისტემების მონიტორინგისათვის უსქ-ის გამოყენებით.

*პრაქტიკული ღირებულება და სამუშაოს შედეგების რეალიზაცია.* სამუშაოს პრაქტიკულ ღირებულებას წარმოადგენს მიღებული შედეგების გამოყენების შესაძლებლობა უსქ-ს პროექტირებისათვის, დაგეგმვისათვის და ზღვრული მახასიათებლების გათვლისათვის. უსადენო სენსორული ქსელების კვლევის შედეგები ასევე გამოყენებული იქნება სასწავლო პროცესში.

*სამუშაოს აპრობაცია.* სადისერტაციო ნაშრომის ძირითადი შედეგები მოხსენებული იყო სტუ-ის ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის ფაკულტეტის ტელეკომუნიკაციის დეპარტამენტში გამართულ, სადოქტორო პროგრამით გათვალისწინებულ, I, II და III კოლოქვიუმებზე და წინასწარ დაცვაზე, ასევე, მოხსენებულ იქნა მე-2 საერთაშორისო სამეცნიერო-ტექნიკურ კონფერენციაზე - „ენერგეტიკის თანამედროვე პრობლემები და მათი გადაწყვეტის გზები“. თბილისი, სტუ, 2020 წლის 7 – 10 დეკემბერი.

გარდა ამისა სადისერტაციო თემის ძირითადი შისი ასახულია 4 პუბლიკაციაში.

*დისერტაციის სტრუქტურა და მოცულობა.* დისერტაცია შედგება: შესავალი, ექვსი თავი, ქვეთავები, დასკვნა და დანართი. დისერტაციის საერთო მოცულობა შეადგენს 129 გვერდს. 62 ნახაზისა და 28 ცხრილის ჩათვლით.

**სამუშაოს ძირითადი შინაარსი.**



შესავალში დასაბუთებულია კვლევის თემის აქტუალობა, განიხილება საკვლევი პრობლემის მდგომარეობა, ფორმულირებულია სამუშაოს მიზანი და ამოცანები, ჩამოთვლილია ძირითადი სამეცნიერო შედეგები, რომელიც მიღებულია დისერტაციაში. განსაზღვრულია პრაქტიკული ღირებულება და შედეგების გამოყენების სფერო, მოყვანილია ინფორმაცია სამუშაოს აპრობაციაზე და წარმოდგენილია ძირითადი დებულებები, გატანილი დაცვაზე.

*პირველი თავი.* განხილულია უსადენო კავშირის ქსელების განვითარების თანამედროვე კონცეფციები, განიხილება და კლასიფიცირდება დღეს ფუნქციონირებადი უსქ-ს დანართები. თავის დასაწყისში ზოგადად აღწერილია ერთ-ერთი თანამედროვე პროტოკოლის ზოგადი განხილვა, რომელიც ახორციელებს ინფორმაციის გადაცემას და ზოგიერთ MAC ფუნქციონალს სხვებთან შედარებით ნაკლები ენერგეტიკული რესურსის გამოყენების ხარჯზე.

ზოგადმი მიმოხილვა არის გაკეთებული უსადენო სენსორულ ქსელებში მოხმარებულ ენერგიაზე. ასევე, განხილულია სხვა და სხვა მეთოდები და ექსპერიმენტული გაზომვები. გაზომილი და გაანალიზებულა სენსორული კვანძის მდგომარეობა მაშინ როდესაც იგი ფუნქციონირების დასასრულს უახლოვდება. განხორციელდება ასევე რამდენიმე პლატფორმის შედარება. ჩამოყალიბებულია სენსორული კვანძების მუშაობის კრიტიკული მხარეები.

ჩამოყალიბებულია კვლევის მიმართულება. დადგენილია ექსპერიმენტის მსვლელობის პროცესი. ამ ექსპერიმენტის მთავარი მიღწევა არის სენსორული კვანძებში სიმძლავრისა და ენერგო მოხმარების დეტალური შესწავლა მათი მუშაობის პროცესში, და მაშინ როდესაც ისინი ფუნქციონირების დასასრულს უახლოვდებოდნენ. რადგან მიუხედავად იმისა, რომ სენსორული კვანძის დახასიათება როდესაც ისინი მუშა ან უფუნქციო მდგომარეობაში იმყოფებიან

თეორიულად მარტივად და ნათლად განიმარტება, ცდების შედეგებიდან დასტურდება, რომ ამის გაკეთება პრაქტიკაში მარტივი აღარ არის.

*მეორე თავი.* მოცემულია სენსორის განმარტება. რომლის მოკლე ინტერპრეტაციას გთავაზობთ „სენსორი წარმოადგენს გამომთვლელ მოწყობილობას რომელიც აწარმოებს დაკვირვებას გარემოში ფიზიკური თუ ქიმიური რეაქციების მსვლელობაზე“. განხილულია ენერგო-მოხმარების დაზოგვის რამდენიმე ექსპერიმენტული მოდელი როგორც არის: „ენერგის მოხმარების კლასიკური მოდელი“, ეს მოდელი გვთავაზობს რადიო სიხშირეზე ენერგეტიკული რესურსის შედარებით შემცირებას ვიდრე ამას ზოგიერთი სტანდარტული მოდელი გვთავაზობს, მაგალითად Bluetooth. „µAMPS სპეციალური მოდელი“, ეს მოდელი ითვალისწინებს მიკროპროცესორის მიერ ენერგო მოხმარებას, დანაკარგებს და განზოგადებულ მოხმარებას რადიო ანტენის მიერ. „Mica2, სპეციალური მოდელი“, რომელიც ჯამური ენერგის მოხმარების პროცესს გვიჩვენებს: გადაცემა-მიღებისთვის, მომლოდინე რეჟიმისთვის, მონცაემთა მიმოცვლისა და ძილის რეჟიმისათვის. „Mica2-ის სპეციალური მოდელის გაანალიზება რეალურ მონაცემებზე დაყრდნობით“, ამ მოდელის მიხედვით მოხმარებული ენერგის გამოთვლა ხდება 1 ბიტი ინფორმაციის გადაცემა-მიღებისაზე, რაც ასევე შეიცავს პროცესორის აქტიურ მდგომარეობას და რადიო მიმღების სიმძლავრეს. ექსპერიმენტის მიხედვით მიხედვით 1 ბიტ ინფორმაციაზე დახარჯული ენერგია შესაძლებელია გამოითვალოს როგორც:

$$\text{ენერგია}_{\text{TX}} = (8 + 21.5) \times 10^{-3} \text{A} \times 3\text{V} \times 416 \times 10^{-6} \text{sec}/8\text{ბიტი} = 4.602 \mu\text{ჯ}/\text{ბიტი}$$

$$\text{ენერგია}_{\text{RX}} = (8 + 7) \times 10^{-3} \text{A} \times 3\text{V} \times 416 \times 10^{-6} \text{sec}/8\text{ბიტი} = 2.34 \mu\text{ჯ}/\text{ბიტი}$$

განხილულია ასევე ექსპერიმენტში გამოყენებული პლატფორმა, ეს პლატფორმა წარმოადგენს Crossbow\_ს სენსორულ კვანძებს სახელწოდებით MRP400 (Mica2) ენერგო მომარაგებას იღებს 2AA ელემენტის საშუალებით.

Crossbow-ს მახასიათებლების მიხედვით, მოდულის ენერგო მომარაგება უნდა ხდებოდეს მუდმივი ძაბვის საშუალებით, რომელიც მერყეობს 2.7-დან 3.3 ვოლტის ფარგლებში. მოდულის ძირითადი შემადგენელი კომპონენტები გახლავთ ერთი Atmel Atmega 128L მიკროკონტროლერი და რადიო ანტენა. აქ ასევე გასათვალისწინებელია ის ფაქტიც, რომ ექსპერიმენტის მსვლელობისას ჩვენ გამოვიყენეთ მრავალჯერადი (გადამუხტვადი) ელემენტები, ერთჯერადის ნაცვლად, რადგან ექსპერიმენტების ჩატარება მრავალჯერადად გვიწევდა.

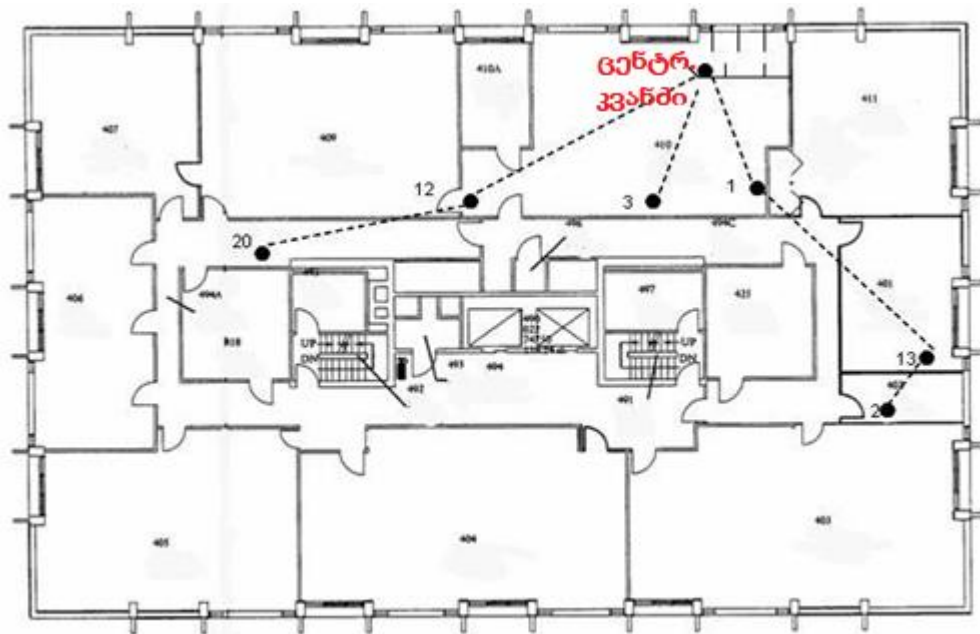
განხილულია სენსორულ კვანძებთან სამუშაო პროგრამული ოპერაციული სისტემა სახელწოდებით TinyOS, ეს ოპერაციული სისტემა სპეციალურად შეიქმნა ისეთი მოწყობილობებისათვის რომელთა მეხსიერების რესურსები, გამოთვლითი შესაძლებლობები და ა.შ შეზღუდულია.

*მესამე თავი.* წარმოჩენილია ექსპერიმენტის მსვლელობის პროცესი, რომლის მიზანს წარმოადგენს ქსელის ქასიცოცხლო პერიოდის გაზომვა, და ასევე იმის გაანსაზღვრა თუ რა დრო დასჭირდება პირველი კვანძის მწყობრიდან საბოლოოდ გამოსვლას.

ქსელი რომელიც ექსპერიმენტის მსვლელობისათვის შევიმუშავეთ შედგება ექვსი სენსორული კვანძისა და ერთი მმართველი ცენტრალური კვანძისაგან. თითოეული კვანძის მოდელი არის Crossbow Mica2 ტიპის, აღჭურვილები მრავალჯერადი გამოყენების AA ტიპის ელემენტებით, კერძოდ Energizer Accu Rechargeable, 1200mA@1.2V Ni-MH. შემდგომში ასევე გამოვიყენეთ Mercury Rechargeable NiMH ტიპის ელემენტები, 2500mA@1.2V. თითოეული ექსპერიმენტი ტარდებოდა მხოლოდ ერთი ტიპის ელემენტებისათვის.

ექსპერიმენტის სამუშაო არეალის განლაგების სქემა შემუშავდა შემდეგნაირად, ექვსი სენსორული კვანძიდან სამს საშუალება ეძლეოდა პირდაპირი კავშირი ეწარმოებინა მმართველ ცენტრალურ კვანძამდე, როლო

დანარჩენ სამს პირდაპირი კავშირის განხორციელების შესაძლებლობა არ აქვს და კავშირის განსახორციელებლად იძულებული იყო გამოეყენებინა არაპირდაპირი საშუალებები, მაგ. ინფორმაციის გადაცემა სხვა მსგავსი სენსორული კვანძების საშუალებით. ამ გზით, საშუალება მოგვეცა ენერგო ეფექტური პროტოკოლის მეთოდი გავანალიზოთ და დაკვირვება მოვახდინოთ ქსელში ინფორმაციულ პაკეტებზე.



ნახ 1. კვანძების განლაგება და კავშირის სქემა

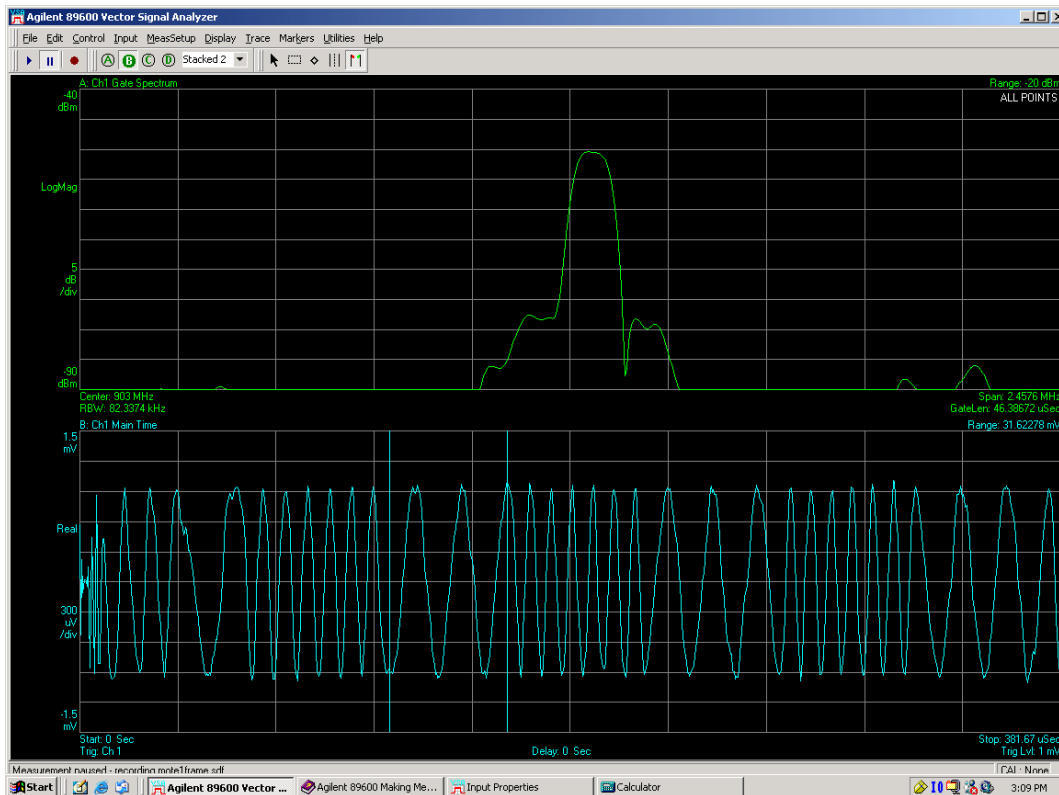
ამავე თავში განხილულია OSI მოდელის, ფიზიკური დონის, საარხო დონის, ქსელის დონის და პროგრამული დონის პროტოკოლები.

**მეოთხე თავი.** განხილულია Crossbow Mica2\_ის ბაზაზე გამოყენებული GSP პროტოკოლის ექსპერიმენტულად მიღებული შედეგები და მათი ანალიზი. შევხვდებით ქსელის სასიცოცხლო დროის გაზომვის რამოდენიმე მეთოდს. ამისათვის ჩატარებულ იქნა რამოდენიმე ტესტი, რათა სათანადო მოდელის შედგენა გახდეს შესაძლებელი. მოცემულია თითოეულ კვანძში მოხმარებული ენერგიის რაოდენობა, რომელიც გამოყენებულია მთლიანობაში ქსელის

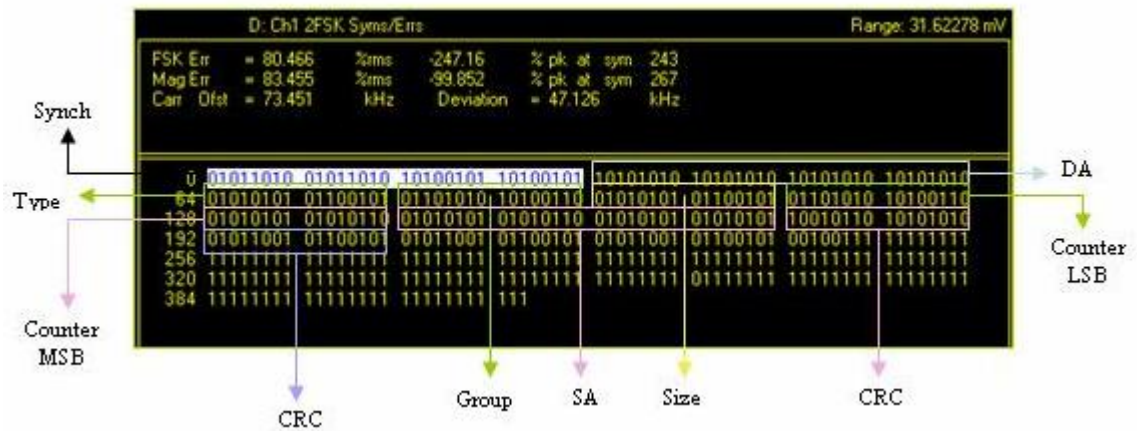
სასიცოცხლო დროის გამოსაანგარიშებლად. საბოლოოდ, კვანძში ენერჯის გამოთვლის მეთოდს განვიხილავთ GSP და CSMA მოდელების მიხედვით.

განხილულია ქსელის სასიცოცხლო დროის განსაზღვრის ორი მეთოდი.

ასევე, შევხებით მოდულირებულის სიგნალის ანალიზს. რადგანაც სიმძლავრის დონე არ ხსნის თუ რატო ხდებოდა პაკეტების ჩავარდნა, ამის გაანალიზება შესაძლებელი გახდა მოდულირებული სიგნალის საშუალებით თუ რატომ ახდენს ცენტრალური სადგური რიგ შემთხვევებში პაკეტების მიღებას და რიგ შემთხვევაში მათ ჩავარდნას.



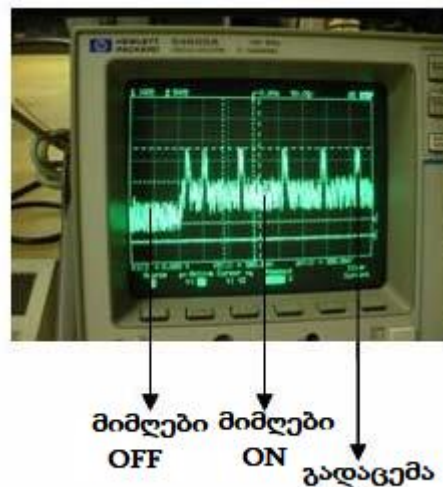
ნახ 2. მიღებული ფრეიმის გრაფი, როდესაც კვანძი ფუნქციონირებს



ნახ 3. დეკოდირებული ფრეიმის სტრუქტურა

ჩატარდება ფრეიმის ანალიზი რათა დავრწმუნებულიყავით, რომ იგი ნამდვილად თავსებადი იყო TinyOS nesC პროგრამის ფუნქციონალთან.

ოსცილოგრაფის საშუალებით გაანალიზდება ენერგო მოხმარების პროცესი



ნახ 4. რეზისტორში არსებული ძაბვის მნიშვნელობა, 903MHz, 5dBm

გამოვიანგარიშებთ სენსორული კვანძის სავარაუდო სასიცოცხლო დროს. ტრაფიკზე ორიენტირებული ენერგო მოხმარების მონაცემებზე დაყრდნობით შესაძლებელია გამოითვალოს სენსორული ქსელის სასიცოცხლო დრო

განსხვავებული პროტოკოლების შემთხვევაში, მანამ სანამ ცნობილია თუ რა დროის რა მონაკვეთი დაჰყვეს ამა თუ იმ ფაზაში ყოფნის დროს.

*მეხუთე თავი.* ამ თავში შევხებით აბლოსიტურად განსხვავებულ პროტოკოლს წინა თავებისგან შედარებით რომელიც ცნობილია თანამედროვე მიდგომის სახელწოდებით. ეს პროტოკოლი ცნობილია LEACH სახელწოდებით.

როგორც წინამორბედი GSP პროტოკოლი, LEACH პროტოკოლიც ასევე მორგებულია უსქ-ის ენერგო ეფექტურ მუშაობაზე. რომლის მიხედვითაც, ენერგო-ეფექტური მუშაობა უსქ-ის უმთავრესი პრობლემაა, რადგან ეს მოწყობილობები შემუშავებულია მრავალწლიანი არამომსახურებადი თვითორგანიზებადი მუშაობისთვის. ენერგო მომსახურების სირთულეს ასევე განაპირობებს სენსორული კვანძების განლაგების არეალი, რომელიც ზოგადად შეიძლება მიუვალი და მიუდგომელი გარემო პირობები იყოს, სადაც სენსორული კვანძებისთვის ელემენტის გამოცვლა შეუძლებელი იქნება. სწორედ ამიტომ ენერგო მომარაგება, კერძოდ მკვებავი ელემენტი უსადენო სენსორული ქსელების უმნიშვნელოვანესი შედაგენელი კომპონენტია.

უსადენო ქსელებში, ენერგიის ძირითადი დანახარჯი ინფორმაციის მიმოცვლაზე მოდის, ამისთვის საჭიროა ენერგიის ოპტიმიზირების პროტოკოლების გამოყენება.

შევხებით სენსორული ქსელის მოდელის განხილვას, LEACH პროტოკოლის მიხედვით. მოგეხსენებათ სენსორული კვანძების განაწილების პროცესი უსქ-ის ერთერთ პრიორიტეტულ პრობლემას წარმოადგენს, რადგან იგი დაკავშირებულია მრავალ ფუნქციონალთან, როგორებიცაა კავშირი, უსაფრთხოება და ენერგო-მოხმარება . მმართველი კვანძის სიახლოვეს განლაგებული რიგითი სენსორული კვანძები სხვებთან შედარებით უფრო მეტ ენერგიას ხარჯავენ, რადგან ეს კვანძები ახდენენ სხვა კვანძებიდან მოსული

ინფორმაციის ტრანზიტულ მიღება-გადაცემას. ამ პრობლემის ფორმულირებისათვის, სენსორული კვანძების ლოკაცია და ცენტრალური სადგურის ადგილმდებარეობა განისაზღვრება 2D გაუსის ელიფსური განაწილების ფუნქციით. გაუსის განაწილების საშუალებით მიღწეულია ენერჯის ბალანსი და გაუმჯობესებულია ქსელის სასიცოცხლო დრო, რადგან სტანდარტულ დევიაციის ფაქტორს აქვს მნიშვნელოვანი გავლენა, როგორც ენერჯის მოხმარებაზე ასევე სასიცოცხლო პერიოდზე. თუ კი ჩავთვლით რომ უსქ შედგება N რაოდენობის სენსორული კვანძებისაგან და ცენტრალური სადგურები განაწილებულია ალბათურად  $M \times M^2$  არეალისთვის. გაუსის განაწილება მიიღებს შემდეგ სახეს:

$$f(a, b) = \frac{1}{2\pi\sigma_a\sigma_b} \exp - \left( \frac{(a - a_0)^2}{2\sigma_a^2} + \frac{(b - b_0)^2}{2\sigma_b^2} \right)$$

სადაც:

$(a_0, b_0)$ : აღნიშნავს, თითოეულის კვანძის განლაგების პოზიციას.

$\sigma_a$  და  $\sigma_b$ : წარმოადგენს a და b განზომილების სტანდარტულ დევიაციას.

ეს პროტოკოლი ასევე გვტავაზობს კლასტერის მმართველი კვანძის შერჩევის მოდიფიცირებულ მეთოდს და მოდიფიცირებული TDMA განრიგების მეთოდს.

*მეექვსე თავი.* ამ თავში ექსპერიმენტული მეთოდი იქნება განხილული Arduino UNO\_ს პლატფორმაზე. როგორც იცით Arduino არ წარმოადგენს სენსორულ მოწყობილობას იგი თავდაპირველად შემუშავებულ იქნა როგორც დეველოპმენტური პლატა ამიტომაც მასში არ მომხდარა დაბალი ენერჯო მოხმარების, პროგრამული თუ აპარატურული, მექანიზმების ინტეგრაცია, თუმცა შესაძლებელია მისი სენსორად გამოყენება. მასში ასევე, არ ხდება ენერჯის რესურდების ეფექტური განაწილება როდესაც მისი ენერჯის წყაროს



წარმოადგენს ელემენტი. ამ შემთხვევაში თითოეული არასწორად გამოყენებული მილიამპერი მუშაობის ხანგრძლივობის შემცირებას იწვევს.

**ცხრილი 1. Arduino Uno დენის მოხმარება LED ჩართულ/გამორთულ მდგომარეობაში**

ჩართული LED	გამორთული LED
55mA	53mA

ექსპერიმენტის ფარგლებში Arduino UNO\_ზე გავაუქმებთ ისეთი აპარატურულ კომპონენტებს რომლებიც მაღალი ენერგო მოთხოვნილებით გამოირჩევიან და სანაცვლოდ გამოვიყენებთ ისეთებს რომელთა ენერგო მოხმარებაც შედარებით დაბალი იქნება.

ექსპერიმენტის ფარგლებში შევასრულებთ შემდეგ ნაბიჯებს:

გავაუქმებთ ძაბვის წრფივ რეგულატორს, რადგანაც უდიდესი ენერგეტიკული დანაკარგები მოდის ძაბვის რეგულატორზე რომელიც ბლოკავს და სითოში გარდაქმნის შემავალი ძაბვის დიდ ნაწილს. პლატა იყენებს წრფივ რეგულატორს, რომელიც სითბურ ენერგიად გარდაქმნის საჭირო ზღვარზე მეტ ენერგიას. მაშინ როდესაც შესვლაზე მიეწოდება 12ვ, ხოლო გამოსასვლელზე ვიღებთ 5ვ-ს, ამ შემთხვევაში იკარგება ენერგიის დაახლოების 58%, რომლის ნაწილი გარდაიქმნება სითბოში და ნაწილს უშუალოდ რეგულატორი იყენებს.

შევამცირებთ ძაბვის მნიშვნელობას, დენის შემცირების ერთ-ერთი მარტივი გზაა Arduino-ს პლატისთვის დაბალი ძაბვის მიწოდება. ძაბვის შემცირება 5ვ-დან 3.3ვ-მდე, დენის გამოყენება ეცემა ~4mA-დან, ~1mA-მდე.

გავაუქმებთ USB სერიულ პორტს, რადგან ენერგიის დაზოგვის არანაირი მექანიზმი არ არის ჩანერგილი USB-ჩიპში, რაც იმას ნიშნავს, რომ ჩიპის ენერგიის მოხმარება რჩება უცვლელი მაშინაც კი როდესაც ის არ გამოიყენება.

გავაუქმებთ LED ინდიკატორებს, რადგან Arduino Uno თავდაპირველად შემუსავებულ იქნა როგორც დეველოპერული პლატა, მასზე კვების მიწოდებას გვიჩვენებს LED ინდიკატორი. დაბალი ენერგო მოხმარებასთან მოსარგებლად, ზედმეტი დანაკარგები არ გვესაჭიროება, ამისათვის მოვახდინეთ LED ნათურების ტრასის გაუქმება.

შევამცირეთ მიკრო პროცესორის ტაქტური სიხშირე. პროექტებში სადაც Arduino\_ს არ ესაჭიროება დიდი რაოდენობის ინსტრუქციების შერულება დროის მცირე მონაკვეთში ან თუ კი სიჩქარე დაბრკოლებას არ წარმოადგენს, პროცესორის ტაქტური სიჩქარის შემცირება რამოდენიმე მილიამპერის დაზოგვის საშუალებას მოგვცემს. მაგალითად, Arduino-ზე რომელიც მუშაობს 5 ვოლტ ძაბვაზე ტაქტური სიჩქარის შემცირება 16მგჰც-დან 8მგჰც-მდე, შეუძლია გამოიწვიოს დენის მოხმარების შემცირება 12mA-დან ~8.5mA-მდე.

საბოლოოდ მოვახდინეთ მოხმარებული ენერჯის შემცირება პროგრამული ჩარევის მეთოდით. შემდეგი ბიბლიოთეკის გამოყენებით და მუშა სკეჩით (კოდი):

Arduino-ს ბიბლიოთეკა - <https://github.com/rocketscream/Low-Power/archive/master.zip>

```
#include "LowPower.h"
void setup()
{
  pinMode(13,OUTPUT);
}
void loop()
{
  digitalWrite(13,HIGH);
  delay(2000);
  digitalWrite(13,LOW);
  LowPower.powerDown(SLEEP_2S, ADC_OFF, BOD_OFF);
}
```

ყოველივე ამის შესრულების შემდეგ ჩვენ მივიღეთ ძაბვის შემცირება და საერთო ჯამში ძაბვის საერთო მოგება 76.8%-ით.

ცხრილი 2. Arduino\_ს მოდიფიცირებით მიღებული შედეგები

სტატუსი	LED ჩართული	LED გამორთული
ძირითადი UNO	55 mA	53 mA
გამორთული LED, USB, UART, Sleep	13.2 mA	12.3 mA

## დასკვნა

ექსპერიმენტი გვიჩვენებს რომ სენსორული კვანძის სასიცოცხლო დრო არ არის დამოკიდებული ცალსახად ენერჯის სარეზერვო ნაწილზე (ელემენტზე). სენსორის სასიცოცხლო დროი შესაძლებელია შეიზღუდოს სხვა შემადგენელი ნაწილებითაც როგორცაა პროგრამული და აპარატურული კომპონენტები. გაზომვები ენერგო მოხმარებასთან დაკავშირებით აღებულ იქნა Mica2-ის სენსორული პლატფორმიდან, ამ მეთოდში გადაცემისთვის გამოვიყენე GSP და CSMA მეთოდები.

ჩვენი შედეგები გვიჩვენებენ, რომ ენერჯის მოხმარება ერთი ბიტის გადაცემის დროს თითქმის ორჯერ აღემატება ენერჯის მოხმარებას ერთი ბიტის მიღებასთან შედარებით. მიღებული შედეგები დადებითია GSP პროტოკოლისათვის, რაც იმ ფაქტით შეიძლება აიხსნას, რომ GSP არ შეიცავს თავსართებს არც უშუალოდ პაკეტის ფორმატში და არც კონტროლ პაკეტის სტრუქტურებში.

ამ ნაშრომში განხილული გაზომვები სრულად არის შესაძლებელი გამოყენებულ იქნას რეალურ პირობებში და ასევე შესაძლებელია მისი კომერციულ წარმოებაში ჩაშვებაც რომელიც შემდგომში სენსორული ქსელების არქიტექტურაში ინტეგრირდება. განხორციელების პროცესი არ არის რთული და არ მოითხოვს დამატებითი ოპერაციებს გატარებას, ასევე არ საჭიროებს დამატებითი მომზადების ფაზებს და სპეციფიურს ოპერაციებს, კვანძის სამუშაო პროცესის დასრულების შემდეგაც. სიმარტივე ასევე იმაში ვლინდება, რომ სენსორული კვანძები არ მოითხოვენ დამატებით აპარატურულ დანამატს GSP მეთოდის განსახორციელებლად.

ასევე, ეს ნაშრომი გვიჩვენებს, რომ სპერიფიური პარამეტრების შემთხვევაში, როგორც მაგალითად ჩვენს სატესტო მონაცემებშია განხილული, სენსორული კვანძების სინქრონიზაციის ოპერაცია GSP მეთოდის შემთხვევაში არ მოითხოვება, რადგანაც ყველა პაკეტი ავტომატურად

ცენტრალურ სადგურზე მიედინება. GSP მეთოდი არ მოიცავს კლასტერიზაციის ოპერაციას და არ გულისხმობს გარკვეული სპეციფიური როლების მინიჭებას სენსორული კვანძებისთვის, რადგან ასეთი ფუნქციები გარკვეულ თავსართს უმატებენ გადასაცემი ინფორმაციის სამუშაო პროტოკოლს.

მიუხედავად იმისა, რომ ტესტირება ჩვენს შემთხვევაში განხორციელდა მხოლოდ ერთი ცენტრალური სადგური გამოყენებით, GSP მეთოდისთვის არ წარმოადგენს დაბრკოლებას თუ რამდენი ცენტრალური სადგური იქნება გამოყენებული სენსორულ ქსელში. სამომავლო სამუშაოები განხორციელდება რამოდენიმე ცენტრალური სადგურის გამოყენებითა და GSP-ს მოქმედებით ასეთი სცენარების შემთხვევაში.

ჩვენ ასევე შევვხებით უსქ-ში გამოყენებულ გადაცემის ალტერნატიულ პროტოკოლს სახელწოდებით LEACH და მის ვარიაციებს, საბოლოოდ შედგენილია მისი გაუმჯობესებული ვარიანტი. ამისათვის გადაჭრილია ორი ამოცანა: პირველი - სწორი და ოპტიმალური კლასტერის მმართველი კვანძის შერჩევა, რაც მიღწეულია კლასტერის შერჩევის ზღვრის მოდიფიცირებით. მეორე, მოდიფიცირებულია პროტოკოლი ქსელში კვანძთაშორისი თანასწორობის მისაღწევად, რის შედეგადაც ქსელის თითოეული კვანძი თანაბარი ოპტიმალური დატვირთვით იმუშავებს. ასევე, მოდიფიცირება გაუკეთდა TDMA განრიგების ცხრილს და განზოგადდა იგი თითოეული სენსორული კვანძისათვის, რაც უზრუნველყოფს კვანძთაშორის თანასწორობას. ამ მეთოდების გაუმჯობესებით მიღწეულია უსქ-ში ენერგო რესურსის ოპტიმალური გადანაწილება. საბოლოოდ დადგენილია, რომ LEACH პროტოკოლის გაუმჯობესებული ვარიანტის გამოყენება მნიშვნელოვნად ზრდის უსქ-ის მუშაობის დროს.

Arduino UNO\_ს პლატის მოდიფიცირებით ძაბვის რეგულატორის ჩანაცვლებით რაც წარმოადგენს გეომეტრიულ ცვლილებას, გამომდინარე

იქიდან, რომ ძაბვის კონვერტაციის ცვალებადობა იზრდება, ასევე გასათვალისწინებელია, რომ ამ სახის ცვლილება არა-წრფივია. საერთო ჯამში ძაბვის საერთო მოგება მივიღეთ 76.8% ეფექტურობით.

განიხილა და მოდიფიცირება განხორციელდა პრაქტიკულ ექსპერიმენტულ სამუშაო პლატფორმაზე, Arduino UNO. მოდიფიცირება განხორციელდა პლატფორმის ენერგო მოხმარების მინიმუმაციისა და სამუშაო სიციცხლის დროის მაქსიმუმაციის მიზნით. საბოლოოდ მიღებულ იქნა ძაბვის საერთო მოგება 76.8% ეფექტურობით (ცხრ. 28).

## დისერტაციის თემაზე გამოქვეყნებული ნაშრომები:

1. ჯიჯურიძე დ. მობილური აპლიკაციები ენერგეტიკაში. მე-2 საერთაშორისო სამეცნიერო-ტექნიკური კონფერენციის - „ენერგეტიკის თანამედროვე პრობლემები და მათი გადაწყვეტის გზები“. „ენერგია“, 2020, №4(96), II, გვ. 163-166.
2. Jijuridze D. Energy consumption minimization in wireless sensor networks according to modern approach. Интернаука, 2021, №13(189), Issue 2, pp. 77-80.
3. Джиджуридзе Д. Внедрение интернета вещей в беспроводных сенсорных сетях. Интернаука, 2021, №14(190), часть 1, стр. 19-23.
4. Джиджуридзе Д. Мобильные беспроводные сенсорные сети. Рассмотрение. Интернаука, 2021, №14(190), стр. 24-27.

## Abstarct

The development and convergence of the Internet, communications and Information Technology, led to the creation of new type of technologies and paved the way to the future technologies which, involves the creation of a new kind of tiny networks called sensor networks. Each sensor network consists tiny devices called sensor nodes. Each sensor node consists of limited processing and computing resources. Sensor nodes with wireless interface can communicate with each other to form a network. Each sensor node uses protocol stack to communicate with each other. Sensor networks protocol stack consists of application layer, transport layer, network layer, data link layer, physical layer and cross-layer protocols. Sensor networks are small sized and low-cost. It is possible to scan differential environmental conditions to organize and collect the data to some location using sensor nodes. It measures of physical conditions like humidity, sound, temperature, pressure, chemical components and vibrations etc., with the growth in technology, sensor network is executed with small, low power, low cost, multi-functional distributed sensors. Sensor nodes can sense, measure and gather information from different environment and they can transmit the sensed data to the central station. The sensor nodes are tightly constrained in terms of transmission power and thus require careful planning of resource, communications and power management.

The development of the sernor networks has made it clear that the requirements with the reduction of their dimensions, work and efficiency duration are more and more growing. In the near future, these kinds of networks will play an important role in our lives, it it already planned to increasing their number to several billions. Technology designed for "sens and monitoring" has great potential for development as they can be used not only in science and engineering but also in other every day householding activities as well as in environment, health care and food technology etc. Reducing the cost of sensor nodes and increasing their quality will lead to industry and business development as these kinds of devices can bring lots of benefits to consumers.

Sensor networks, transmission and power consumption mainly depends on the protocol, that the device is using. GSP is a Gossip-based sleep protocol, which transmit less energy expense information and perform some MAC function compared to others. The effective functioning of GSP has been proven experimentally. GSP is testing the Mica2 platform to extend the network lifecycle. As a result, energy efficiency was obtained, as well as the transfer and reception, for which less energy needs to be spent. Therefore we considere a variety of methods and experimental measurements, one of whitch wil be LEACH protocol.

As we have already mentioned wireless sensor networks (WSN) consist of low power devices that are distributed in geographically isolated areas. Sensors are arranged in clusters. Each cluster defines a vital node which is known as a cluster



head (CH). Each CH collects the sensed data from its sensor nodes to be transmitted to a central station (CS). Sensors are deployed with batteries that cannot be replaced. The energy consumption is an important concern for WSN. I propose an enhancement approach to reduce the energy consumption and extend the network lifetime. It has been accomplished by augmenting the energy balancing in clusters among all sensor nodes to minimize the energy dissipation during network communications. The improved method is based on a cluster head selection method. In addition, an enhanced schedule of the TDMA has been implemented. Finally, the development approach indicates the progress in terms of network lifetime, Number of cluster head, energy consumption and number of packets transferred to CS compared to GSP, LEACH and other related protocols.

The condition of the sensor node will be assessed and analyzed when it comes to completion of functionality. In most of the cases the nodes are battery powered and it is not possible to supply them with continuous power supply or change the battery most often. The sensors majorly spend their energy in collecting and transmitting the data. And the data transmission operation consumes more energy than data sensing. The issue of power saving in wireless sensor networks is very paramount in the current scenario of miniaturization.