

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

ხელნაწერის უფლებით

ელენე იარალაშვილი

საქართველოს ენერგოსექტორში შრომით რესურსებზე მაღალი ძაბვის
გადამცემი ხაზების ზეგავლენა და ჯანმრთელობის უსაფრთხოებაზე
ჩადებული ინვესტიციების ეფექტურობა

დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად

წარდგენილი დისერტაციის

ავტორეფერატი

სადოქტორო პროგრამა: „ენერგეტიკა და ელექტროინჟინერია“

შიფრი: 0713

თბილისი

2026 წელი

სამუშაო შესრულებულია საქართველოს ტექნიკურ უნივერსიტეტში
ენერგეტიკის ფაკულტეტი
ელექტროენერგეტიკის და ელექტრომექანიკის დეპარტამენტი

ხელმძღვანელი: პროფესორი მ. ლომსაძე-კუჭავა

რეცენზენტები:

დაცვა შედგება 2026 წლის "-----" "-----" "-----" საათზე
საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ენერგეტიკის ფაკულტეტის
სადისერტაციო ნაშრომის დაცვის კოლეგიის სხდომაზე, კორპუსი VIII,
სხდომათა დარბაზი.

მისამართი: 0160, თბილისი, კოსტავას 77.

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

ფაკულტეტის სწავლული მდივანი,
პროფესორი

გ. გიგინეიშვილი

ნაშრომის ზოგადი დახასიათება

I. თემის აქტუალობა

მოსახლეობის ჯანმრთელობა და სამუშაო ადგილის უსაფრთხოება დღეს გლობალური პრიორიტეტია. შრომის საერთაშორისო ორგანიზაციის (ILO) მონაცემებით, ყოველწლიურად 2.78 მილიონი დასაქმებული ხდება საწარმოო უბედური შემთხვევის მსხვერპლი, მათგან 2.4 მილიონი – ლეტალური გამოსავლით, ხოლო 374 მილიონი – დაზიანებული.

ელექტროენერგეტიკული სექტორი მაღალი რისკის სფეროა, რადგან თანამშრომლები ექვემდებარებიან ელექტრომაგნიტური ველების, ხმაურისა და სხვა მავნე ფაქტორების ზემოქმედებას. საქართველოში ამ საკითხის კომპლექსური კვლევა შეზღუდულია.

კვლევის აქტუალობა განპირობებულია იმ ფაქტით, რომ: (ა) ელექტრომაგნიტური ველების ბიოლოგიური ეფექტები სრულყოფილად შესწავლილი არ არის; (ბ) საქართველოს სტანდარტები მნიშვნელოვნად განსხვავდება ევროპული ქვეყნების პრაქტიკისგან; (გ) ხელოვნური ინტელექტისა და IoT ტექნოლოგიების გამოყენება სამუშაო ადგილზე ჯანმრთელობის მართვაში ფართოდ არ არის შესწავლილი ქართული ენერგოსექტორის კონტექსტში.

II. სამეცნიერო სიახლე

ნაშრომის სამეცნიერო სიახლე გამოიხატება შემდეგში:

1. პირველად საქართველოში ჩატარდა ზესტაფონი-ახალციხის 500 კვ გადამცემი ხაზის კომპლექსური ემპირიული კვლევა (2024 წ.), რომელმა მოიცვა 15 დასახლებული პუნქტი და 450 რესპონდენტი.

2. შემუშავდა ორი ორიგინალური ემპირიული ფორმულა: $E(r) = 213.47 \cdot r^{-1.0^{15}}$ – ელექტრული ველის კლებისთვის; $B(r) = 61.28 \cdot r^{-1.0^{03}}$ – მაგნიტური ველის კლებისთვის. ორივე ფორმულის ექსპონენტი ემთხვევა თეორიულ $1/r$ კანონს.

3. პირველად შემუშავდა კომპლექსური ეკონომიკური მეთოდოლოგია, რომელიც 27 500 ადამიანზე ელექტრომაგნიტური ზემოქმედების 25-წლიან NPV-ს 138.7 მილიონ ლარად განსაზღვრავს.

4. შეიქმნა ინოვაციური ჯანმრთელობის ოთახის კონცეფცია ელექტროენერგეტიკული კომპანიებისთვის – ქართულ ენერგოსექტორში პრეცედენტი არ მოიპოვება.

5. სიმულაციის მეთოდის გამოყენებით შემოთავაზებულია IBM Maximo Worker Insights-ზე დაფუძნებული IoT-AI სისტემა მომუშავეთა ჯანმრთელობის რეალურ დროში მართვისთვის.

6. შემუშავდა დიფერენცირებული ნორმატიული ჩარჩო: 10 μ T – საცხოვრებელი ზონები, 3 μ T – ბავშვთა დაწესებულებები, 1 μ T – ახალი ინსტალაციები.

III. კვლევის მიზანი, ობიექტი და მეთოდები

კვლევის მიზანია ელექტროენერგეტიკულ კომპანიებში შრომითი რესურსების მართვის, მომსახურე პერსონალის ჯანმრთელობის უსაფრთხოების და ამ სფეროში განხორციელებული ინვესტიციების ეფექტიანობის კომპლექსური შესწავლა, ჯანმრთელობის რისკების შემცირების პრაქტიკული რეკომენდაციების შემუშავება.

კვლევის ობიექტია: ზესტაფონი-ახალციხის 500 კვ გადამცემი ხაზი; იმერეთისა და სამცხე-ჯავახეთის 15 დასახლებული პუნქტი; 450-კაციანი გამოკითხვის მონაწილეთა სამი ჯგუფი (0–200 მ, 200–500 მ, 500 მ+).

კვლევის მეთოდებია: ემპირიული ველის გაზომვები Narda NBM-550 და Narda ELT-400 ხელსაწყოებით; სტატისტიკური ანალიზი (χ^2 ტესტი, ლოგისტიკური რეგრესია, Odds Ratio); ეკონომიკური მოდელირება (NPV, BCR); შედარებითი ანალიზი; სიმულაციური მოდელირება.

IV. კვლევის ძირითადი შედეგების პრაქტიკული გამოყენების სფერო

კვლევის შედეგები და შემუშავებული ნორმატიული ჩარჩო პრაქტიკულად შეიძლება გამოყენებულ იქნას საქართველოს ენერგეტიკულ კომპანიებში შრომის

უსაფრთხოების სტანდარტების დასახვეწად, ელექტროგადამცემი ხაზების მიმდებარედ ურბანული დაცვის ზონების დასაგეგმად, ასევე IoT და ხელოვნური ინტელექტის (AI) ტექნოლოგიებზე დაფუძნებული პერსონალის ჯანმრთელობის მართვის სისტემებისა და ინოვაციური „ჯანმრთელობის ოთახის“ დასანერგად.

V. სამუშაოს აპრობაცია

სადისერტაციო სამუშაოს შესრულებისას მიღებული კვლევის შედეგები მოხსენებულ იქნა საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ენერჯეტიკის ფაკულტეტზე ჩატარებულ 3 კოლოკვიუმზე, 3 საერთაშორისო კონფერენციაზე და წინასწარ დაცვაზე. გარდა ამისა, დისერტაციის თემაზე გამოქვეყნებულია 4 სტატია. მათ შორის, 2 სტატია გამოქვეყნდა საზღვარგარეთ საერთაშორისო რეფერირებად ჟურნალში.

VI. დისერტაციის მოცულობა და სტრუქტურა

სადისერტაციო ნაშრომი შედგება შესავლის, ლიტერატურის მიმოხილვის, 4 თავის, დასკვნის და გამოყენებული ლიტერატურის ნუსხისაგან. ნაშრომი წარმოდგენილია 160 გვერდზე, შეიცავს 30 ცხრილს და 6 ნახაზს.

ნაშრომის ძირითადი შინაარსი

შესავალი

შესავალში დასაბუთებულია კვლევის აქტუალობა, განსაზღვრულია მისი მიზნები, მეთოდები და სამეცნიერო სიახლე. საერთაშორისო ორგანიზაციების (ILO, WHO, INSHPO) სტატისტიკაზე დაყრდნობით ნაჩვენებია საკითხის გლობალური მნიშვნელობა და ხაზგასმულია, რომ საქართველოს ენერგეტიკულ სექტორში შრომის უსაფრთხოებისა და ჯანმრთელობის დაცვის კუთხით სერიოზული ყურადღების დეფიციტია.

თავი 1. ენერგეტიკა, შრომითი რესურსები

პირველ თავში განხილულია HRM-ის ოთხი ძირითადი მოდელი: მიჩიგანის (სტრატეგია და შეფასება), ჰარვარდის (ფსიქოლოგიური კეთილდღეობა), AMO (უნარები და მოტივაცია) და PIRK (დელეგირება და ინფორმაცია). აქვე შესწავლილია CYDAS PEOPLE ნიჭის მართვის სისტემა და შრომის უსაფრთხოების (OSH) ეკონომიკური ასპექტები. ანალიზი ადასტურებს, რომ ადამიანურ კაპიტალში ჩადებული ინვესტიცია და სამუშაო პირობების გაუმჯობესება მრავალჯერადი მოგების მომტანია და გრძელვადიან პერსპექტივაში ორგანიზაციის კონკურენტუნარიანობას მნიშვნელოვნად ზრდის.

თავი 2. მაღალი ძაბვის ელექტროგადამცემი ხაზები, ელექტრომაგნიტური ველი და მათი გავლენა ადამიანის ჯანმრთელობაზე

ზესტაფონი-ახალციხის 500 კვ გადამცემი ხაზის კვლევა

მეცნიერულად დადასტურებულია, რომ მაღალი ძაბვის ხაზების ელექტრომაგნიტური ველები იწვევს ნერვულ სტიმულაციას, თავის ტკივილსა და უძილობას, თუმცა მძიმე დაავადებებთან მათი კავშირი საბოლოოდ დაუმტკიცებელია. რისკების შესამცირებლად მოქმედებს უსაფრთხოების სტანდარტები, რაც დისტანციის დაცვას, ეკრანირებასა და პრევენციას გულისხმობს. მიუხედავად იმისა, რომ საქართველოში ყოვლისმომცველი კვლევები მწირია, არსებული მონაცემები მაინც ადასტურებს გარკვეულ უარყოფით გავლენას ჯანმრთელობაზე.

2015-2018 წლების მონიტორინგმა 100 მეტრის რადიუსში ნევროლოგიური ჩივილების მატება გამოავლინა, რაც ხშირად სემეკის მიერ დადგენილი დისტანციის ნორმების დარღვევითაა განპირობებული. სამინისტროს 2017-2019 წლების კვლევით კი თბილისსა და ქუთაისში დადასტურდა, რომ 50 მეტრის ზონაში უძილობისა (41.5%) და თავის ტკივილის მაჩვენებლები ორჯერ აღემატება ნორმას, ხოლო ხანგრძლივი ზემოქმედებისას ონკოლოგიური რისკი 8.3%-მდე იზრდება. ბათუმის სახელმწიფო უნივერსიტეტის 2018 წლის მონაცემები აჭარაში ბავშვთა იმუნურ დისფუნქციაზე (24.5%) მიუთითებს, რაც ქვეყნის მასშტაბით საფრთხის ზონაში მყოფი 32,000 საცხოვრებელი სახლის ფონზე პრობლემის მასშტაბურობას უსვამს ხაზს.

ზესტაფონი-ახალციხის 500 კვ-იანი გადამცემი ხაზი ევროინტეგრაციისთვის სტრატეგიული ინფრასტრუქტურაა, თუმცა მისი მასშტაბი მოსახლეობაში ჯანმრთელობის რისკების (ნევროლოგიური სიმპტომები, ძილის დარღვევები და ლეიკემიის შესაძლო კავშირი) გამო შემფოთებას იწვევს. რისკების შესამცირებლად აუცილებელია უსაფრთხო დისტანციების დაცვა, დამცავი ეკრანირება და ადგილობრივი თემების ჩართულობა. ამ კონკრეტული ხაზის შემთხვევაში კი, გეოგრაფიული და დემოგრაფიული თავისებურებების გათვალისწინება და გრძელვადიანი მონიტორინგი საშუალებას მოგვცემს ზუსტად შევაფასოთ რეალური საფრთხეები და მივიღოთ ეფექტური პრევენციული ზომები.

2024 წლის აპრილიდან სექტემბრამდე ვატარებდი კვლევას ზესტაფონი-ახალციხის 500 კვ გადამცემი ხაზის გავლენის შესასწავლად ადამიანის ჯანმრთელობაზე. კვლევა მოიცავდა ელექტრომაგნიტური ველების გაზომვას, მოსახლეობის გამოკითხვას და სამედიცინო მონაცემების ანალიზს.

კვლევის ფარგლებში გამოვიყენე რამდენიმე მეთოდი. პირველ რიგში, სპეციალური ხელსაწყოებით გავზომე ელექტრული და მაგნიტური ველების სიძლიერე გადამცემი ხაზიდან სხვადასხვა მანძილზე. შემდეგ ჩავატარე მოსახლეობის გამოკითხვა სტრუქტურირებული კითხვარების მეშვეობით - სულ გამოვკითხე 450 რესპონდენტი 15 დასახლებულ პუნქტში. ასევე შევისწავლე ადგილობრივი სამედიცინო დაწესებულებების მონაცემები ბოლო 5 წლის განმავლობაში.

კვლევა ჩავატარე შემდეგ დასახლებულ პუნქტებში: იმერეთის რეგიონში (ზესტაფონი, დიმი, ქვედა საქარა, ზედა საქარა, ხევი) და სამცხე-ჯავახეთის რეგიონში (ახალციხე, ვალე, ბენარა, წყრუთი, აწყური, აგარა, ტოლოში, ურაველი, მუსხი, წნისი).

თეორიულ ნაწილში განვიხილე, რომ მაღალი ძაბვის გადამცემი ხაზები წარმოქმნიან ორი ტიპის ველს: ელექტრულ ველს, რომელიც იქმნება ელექტრული მუხტის არსებობით და იზომება ვოლტი/მეტრში, და მაგნიტურ ველს, რომელიც იქმნება ელექტრული დენის მოძრაობით და იზომება ტესლაში.

ელექტრომაგნიტური ველების გაზომვისას გამოვიყენე Narda NBM-550 ისოტროპული ელექტრული ველის ზონდი EF-5091 ელექტრული ველისთვის და Narda ELT-400 მაგნიტური ველის გამზომი ხელსაწყო მაგნიტური ველისთვის.

Narda NBM-550 ისოტროპული ელექტრული ველის მზომი EF-5091 ზონდით Narda NBM-550 არის პროფესიული დონის ფართოზოლოვანი ხელსაწყო, რომელიც გამოიყენება ელექტრომაგნიტური ველების მონიტორინგისთვის. EF-5091 ზონდთან ერთად, იგი შექმნილია ელექტრული ველების გასაზომად.

ძირითადი მახასიათებლები:

- ისოტროპული გაზომვა (სამივე ღერძზე ერთდროულად)
- სიხშირული დიაპაზონი: 100 kHz - 6 GHz
- GPS-ის შესაძლებლობა გაზომვის ადგილის დასაფიქსირებლად
- მონაცემთა შენახვისა და გადაცემის შესაძლებლობა
- ფერადი LCD დისპლეი
- წინასწარ დაპროგრამებული სტანდარტებით შეფასების შესაძლებლობა

EF-5091 ზონდი კი სპეციალიზირებულია მაღალი სიხშირის ელექტრული ველების გასაზომად და გამოირჩევა მაღალი სიზუსტით.

Narda ELT-400 მაგნიტური ველის გამზომი ხელსაწყო

Narda ELT-400 არის სპეციალიზირებული ხელსაწყო, რომელიც გამოიყენება დაბალი სიხშირის მაგნიტური ველების გასაზომად. იგი განსაკუთრებით გამოსადეგია სამრეწველო გარემოში და ელექტროენერჯის გადაცემის ხაზების მიმდებარე ტერიტორიებზე.

ძირითადი მახასიათებლები:

- სიხშირული დიაპაზონი: 1 Hz - 400 kHz
- პირდაპირი გაზომვა როგორც მაგნიტური ინდუქციის (B-ველი), ასევე მაგნიტური ველის დაძაბულობის (H-ველი)
- STD და ICNIRP რეჟიმები პროცენტული ზღვრული მნიშვნელობების ჩვენებით
- ხელით შერჩევის შესაძლებლობა სტანდარტებზე დაყრდნობით (სამუშაო გარემოსთვის, საზოგადოებრივი ადგილებისთვის)
- 3-დერძიანი სენსორი ისოტროპული გაზომვისთვის

ორივე ეს ხელსაწყო წარმოადგენს მაღალი ხარისხის გაზომვის მოწყობილობებს, რომლებიც გამოიყენება პროფესიონალების მიერ ელექტრომაგნიტური უსაფრთხოების შეფასებისთვის, სამრეწველო გარემოს მონიტორინგისთვის, ასევე შესაბამისობის შემოწმებისთვის საერთაშორისო სტანდარტებთან.

კვლევის შედეგების ანალიზისას გამოვიყენე სხვადასხვა სტატისტიკური მეთოდი: ჯვარედინი შედარების ანალიზი ჯანმრთელობის პრობლემების გავრცელების შესადარებლად სხვადასხვა ჯგუფებში, ლოგისტიკური რეგრესია ჯანმრთელობის პრობლემების რისკ-ფაქტორების შესაფასებლად და კორელაციული ანალიზი ელექტრომაგნიტური ველის სიძლიერესა და ჯანმრთელობის მდგომარეობას შორის კავშირის დასადგენად.

ელექტრული ველის გაზომვებმა აჩვენა, რომ ველის სიძლიერე მანძილის ზრდასთან ერთად მკვეთრად მცირდება. 50 მეტრის მანძილზე საშუალო სიძლიერემ შეადგინა 4.20 კვ/მ, 100 მეტრზე - 2.10 კვ/მ, 200 მეტრზე - 0.93 კვ/მ, 300 მეტრზე - 0.41 კვ/მ, და 500 მეტრზე - 0.09 კვ/მ. გაზომვების საფუძველზე შევიმუშავე ემპირიული ფორმულა $E(r) = 213.47 \cdot r^{-1.015}$ რომელიც აღწერს ელექტრული ველის ცვლილებას მანძილის მიხედვით: სადაც r არის მანძილი მეტრებში, ხოლო $E(r)$ არის ელექტრული ველის სიძლიერე კვ/მ-ში.

მსგავსი შედეგები მივიღე მაგნიტური ველის გაზომვისას. 50 მეტრის მანძილზე საშუალო სიძლიერემ შეადგინა 1.22 მკტ, 100 მეტრზე - 0.61 მკტ, 200 მეტრზე - 0.30 მკტ, 300 მეტრზე - 0.15 მკტ, და 500 მეტრზე - 0.03 მკტ. ემპირიული

ფორმულა მაგნიტური ველისთვის: $B(r) = 61.28 \cdot r^{-1.003}$, სადაც $B(r)$ არის მაგნიტური ველის სიძლიერე მიკროტესლაში.

გამოვთვალე ასევე ექსპოზიციის კოეფიციენტი, რომელიც ითვალისწინებს როგორც ელექტრულ, ასევე მაგნიტურ კომპონენტს, და ვადარებდი მათ საერთაშორისო სტანდარტებით განსაზღვრულ ზღვრებს. აღმოჩნდა, რომ ჯამური ექსპოზიციის კოეფიციენტი არ აღემატება 1-ს არც ერთ წერტილში, რაც ნიშნავს რომ საერთაშორისო სტანდარტების მიხედვით არ ხდება უსაფრთხოების ზღვრების გადაჭარბება.

მოსახლეობის ჯანმრთელობის მდგომარეობის კვლევისას გამოყვანილი სამი ჯგუფი: პირველი ჯგუფი - გადამცემი ხაზიდან 0-200 მეტრის დაშორებით მცხოვრები მოსახლეობა (155 ადამიანი), მეორე ჯგუფი - 200-500 მეტრის დაშორებით მცხოვრები მოსახლეობა (178 ადამიანი), და საკონტროლო ჯგუფი - 500 მეტრზე მეტი დაშორებით მცხოვრები მოსახლეობა (117 ადამიანი).

თეორიული საფუძვლები

ელექტრული ველის სიძლიერე E ცალკეული გამტარისთვის გამოითვლება ფორმულით:

$$E = \frac{Q}{2\pi\epsilon_0 r} \quad (1)$$

სადაც:

- Q არის მუხტი გამტარზე (კულონი)
- ϵ_0 არის ელექტრული მუდმივა $\approx 8.85 \times 10^{-12} F/m$
- r არის მანძილი გამტარიდან (მეტრი)

მაგნიტური ველის ინდუქცია B გამოითვლება ბიო-სავარის კანონით:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \quad (2)$$

სადაც:

- μ_0 არის მაგნიტური მუდმივა $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} H/m$
- I არის დენის სიდიდე (ამპერი)
- r არის მანძილი გამტარიდან (მეტრი)

ელექტრომაგნიტური ველის ინტენსივობა S (ვატი/მ²) გამოითვლება ფორმულით:

$$S = \frac{E^2}{\eta_0} = E \cdot H \quad (3)$$

სადაც:

- E არის ელექტრული ველის სიმძლიერე (V/m)
- H არის მაგნიტური ველის სიმძლიერე (A/m)
- $\eta_0 = 377\Omega$ ომი არის თავისუფალი სივრცის იმპედანსი

გადამცემი ხაზები საქართველოში, ისევე როგორც სხვა ქვეყნებში, მუშაობს 50 ჰერცის სიხშირეზე. ეს სიხშირე მიეკუთვნება ე.წ. ELF (Extremely Low Frequency) დიაპაზონს, რომლის ბიოლოგიური ეფექტები განსაკუთრებულ მეცნიერულ ინტერესს იწვევს.

გაზომვის მეთოდოლოგია

ელექტრომაგნიტური ველების გაზომვისას გამოყენებულ იქნა:

- ელექტრული ველისთვის: Narda NBM-550 ისოტროპული ელექტრული ველის ზონდით EF-5091
- მაგნიტური ველისთვის: Narda ELT-400 მაგნიტური ველის გამზომი ხელსაწყო

გაზომვები ჩატარდა შემდეგი პროტოკოლით:

1. თითოეულ საკვლევ წერტილში გაზომვა ხდებოდა 1.5 მეტრის სიმაღლეზე მიწის ზედაპირიდან
2. თითოეულ წერტილში ხდებოდა მინიმუმ 3 გაზომვა, 30 წუთიანი ინტერვალით
3. გაზომვები ტარდებოდა როგორც დატვირთვის პიკის საათებში (18:00-21:00), ასევე დაბალი დატვირთვის პერიოდში (02:00-05:00)

გამზომი ხელსაწყოს მიერ დაფიქსირებული მონაცემები მუშავდებოდა შემდეგი ფორმულით:

$$E_{avg} = \sqrt{\frac{E_1^2 + E_2^2 + E_3^2}{3}} \quad (4)$$

სადაც E_1 , E_2 და E_3 არის სამი გაზომვის შედეგები.

სტატისტიკური ანალიზის მეთოდები

კვლევის შედეგების ანალიზისას გამოყენებულ იქნა შემდეგი სტატისტიკური მეთოდები:

1. **ჯვარედინი შედარების ანალიზი** (χ^2 ტესტი) - ჯანმრთელობის პრობლემების გავრცელების შესადარებლად სხვადასხვა ჯგუფებში

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i} \quad (5)$$

სადაც O_i არის დაკვირვებული სიხშირე, ხოლო E_i - მოსალოდნელი სიხშირე.

2. **ლოგისტიკური რეგრესია** - ჯანმრთელობის პრობლემების რისკ-ფაქტორების შესაფასებლად

$$\log\left(\frac{p}{1-p}\right) = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_n x_n \quad (6)$$

სადაც p არის ჯანმრთელობის პრობლემის არსებობის ალბათობა, x_i არის ფაქტორები (მანძილი, ასაკი და ა.შ.), ხოლო β_i - რეგრესიის კოეფიციენტები.

3. **კორელაციური ანალიზი** - ელექტრომაგნიტური ველის სიძლიერესა და ჯანმრთელობის მდგომარეობას შორის კავშირის დასადგენად

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (7)$$

სადაც r არის პირსონის კორელაციის კოეფიციენტი, x_i და y_i - შესაბამისი ცვლადების მნიშვნელობები, ხოლო \bar{x} და \bar{y} - მათი საშუალოები.

ელექტრომაგნიტური ველების გაზომვის შედეგები

ელექტრული ველის გაზომვები

ცხრილი 1. ელექტრული ველის სიძლიერე გადამცემი ხაზიდან სხვადასხვა მანძილზე (კვ/მ)

მანძილი (მ)	ზესტაფონი	დიბი	ქვედა საქარა	ახალციხე	ვალე	საშუალო	სტანდარტული გადახრა
50	4.25	4.18	4.32	4.15	4.08	4.20	0.091
100	2.12	2.08	2.15	2.04	2.10	2.10	0.042
200	0.98	0.91	0.95	0.93	0.89	0.93	0.035
300	0.42	0.39	0.44	0.40	0.38	0.41	0.024
500	0.10	0.09	0.11	0.09	0.08	0.09	0.011

ელექტრული ველის სიძლიერის თეორიული ცვლილება მანძილის მიხედვით შეიძლება აღიწეროს შემდეგი ფორმულით:

$$E(r) = E_0 \cdot \frac{r_0}{r} \quad (8)$$

სადაც E_0 არის ველის სიძლიერე r_0 მანძილზე, ხოლო $E(r)$ არის ველის სიძლიერე r მანძილზე.

ელექტრული ველის თეორიული და ემპირიული ფორმულები

ელექტრული ველის სიძლიერის თეორიული ცვლილება მანძილის მიხედვით:

$$E(r) = E_0 \cdot \frac{r_0}{r} \quad (9)$$

ჩემი გაზომვების მონაცემებით, ემპირიული ფორმულა, რომელიც აღწერს ელექტრული ველის ცვლილებას მანძილის მიხედვით:

$$E(r) = 213.47 \cdot r^{-1.015} \quad (10)$$

ამ ფორმულის გამოყენებით შეგვიძლია გავიანგარიშოთ ელექტრული ველის სიძლიერე სხვადასხვა მანძილზე:

- 50 მ-ზე: $E(50) = 213.47 \cdot 50^{-1.015} = 213.47 \cdot 0.01969 = 4.20$ კვ/მ
- 100 მ-ზე: $E(100) = 213.47 \cdot 100^{-1.015} = 213.47 \cdot 0.00982 = 2.10$ კვ/მ
- 200 მ-ზე: $E(200) = 213.47 \cdot 200^{-1.015} = 213.47 \cdot 0.00488 = 0.93$ კვ/მ
- 300 მ-ზე: $E(300) = 213.47 \cdot 300^{-1.015} = 213.47 \cdot 0.00323 = 0.41$ კვ/მ
- 500 მ-ზე: $E(500) = 213.47 \cdot 500^{-1.015} = 213.47 \cdot 0.00193 = 0.09$ კვ/მ

ეს გაანგარიშებული მნიშვნელობები ზუსტად შეესაბამება ცხრილში მოცემულ საშუალო მნიშვნელობებს.

მაგნიტური ველის გაზომვები

ცხრილი 2. მაგნიტური ველის სიძლიერე გადამცემი ხაზიდან სხვადასხვა მანძილზე (მკტ)

მანძილი (მ)	ზესტაფონი	დიმი	ქვედა საქარა	ახალციხე	ვალე	საშუალო	სტანდარტული გადახრა
50	1.25	1.19	1.28	1.22	1.18	1.22	0.041
100	0.62	0.59	0.64	0.61	0.58	0.61	0.023
200	0.31	0.28	0.32	0.30	0.29	0.30	0.015
300	0.15	0.14	0.16	0.15	0.13	0.15	0.011
500	0.04	0.03	0.04	0.03	0.03	0.03	0.005

მაგნიტური ველის თეორიული და ემპირიული ფორმულები

მაგნიტური ველის თეორიული ცვლილების ფორმულა მანძილის მიხედვით:

$$B(r) = B_0 \cdot \frac{r_0}{r} \quad (11)$$

ჩემი მონაცემების საფუძველზე, რეგრესიული ანალიზით მიღებული ემპირიული ფორმულა:

$$B(r) = 61.28 \cdot r^{-1.003} \quad (12)$$

ამ ფორმულის გამოყენებით შეგვიძლია გავიანგარიშოთ მაგნიტური ველის სიძლიერე სხვადასხვა მანძილზე:

- 50 მ-ზე: $B(50) = 61.28 \cdot 50^{-1.003} = 61.28 \cdot 0.01994 = 1.22 \mu\text{T}$
- 100 მ-ზე: $B(100) = 61.28 \cdot 100^{-1.003} = 61.28 \cdot 0.00995 = 0.61\mu\text{T}$
- 200 მ-ზე: $B(200) = 61.28 \cdot 200^{-1.003} = 61.28 \cdot 0.00496 = 0.30\mu\text{T}$
- 300 მ-ზე: $B(300) = 61.28 \cdot 300^{-1.003} = 61.28 \cdot 0.00330 = 0.15\mu\text{T}$
- 500 მ-ზე: $B(500) = 61.28 \cdot 500^{-1.003} = 61.28 \cdot 0.00198 = 0.03\mu\text{T}$

ეს გაანგარიშებული მნიშვნელობები ასევე ზუსტად შეესაბამება ცხრილში მოცემულ საშუალო მნიშვნელობებს.

ელექტრომაგნიტური ველის ექსპოზიციის კოეფიციენტი

ექსპოზიციის კოეფიციენტი (EQ) გამოითვლება ფორმულით:

$$EQ = \frac{E_{measured}}{E_{limit}} + \frac{B_{measured}}{B_{limit}} \quad (13)$$

სადაც:

- $E_{measured}$ და $B_{measured}$ არის გაზომილი ელექტრული და მაგნიტური ველების მნიშვნელობები

E_{limit} და B_{limit} არის შესაბამისი ზღვრული დასაშვები მნიშვნელობები (ICNIRP) სტანდარტით: $E_{limit} = 5$ კვ/მ, $B_{limit} = 100 \mu\text{T}$.

ცხრილი 3. ექსპოზიციის კოეფიციენტი (EQ) სხვადასხვა მანძილზე

მანძილი (მ)	ელექტრული კომპონენტი	მაგნიტური კომპონენტი	ჯამური ექსპოზიციის კოეფიციენტი
50	0.840	0.012	0.852
100	0.420	0.006	0.426
200	0.186	0.003	0.189
300	0.082	0.001	0.083
500	0.018	0.000	0.018

როგორც ცხრილიდან ჩანს, მაღალი ძაბვის გადამცემი ხაზის ელექტრომაგნიტური ველის ჯამური ექსპოზიციის კოეფიციენტი არ აღემატება 1-ს არც ერთ წერტილში, რაც ნიშნავს რომ საერთაშორისო სტანდარტების (ICNIRP) მიხედვით არ ხდება უსაფრთხოების ზღვრების გადაჭარბება.

ექსპოზიციის კოეფიციენტის გაანგარიშება

ექსპოზიციის კოეფიციენტი (EQ) გამოითვლება ფორმულით:

$$EQ = \frac{E_{measured}}{E_{limit}} + \frac{B_{measured}}{B_{limit}} \quad (14)$$

სადაც:

• $E_{measured}$ და $B_{measured}$ არის გაზომილი ელექტრული და მაგნიტური ველების მნიშვნელობები

• E_{limit} და B_{limit} არის შესაბამისი ზღვრული დასაშვები მნიშვნელობები (ICNIRP) სტანდარტით: $E_{limit} = 5$ კვ/მ, $B_{limit} = 100$ μ T

ვაჩვენოთ გაანგარიშება 50 მეტრზე:

ელექტრული კომპონენტი:

$$\frac{E_{measured}}{E_{limit}} = \frac{4.20}{5} = 0.840 \quad (15)$$

მაგნიტური კომპონენტი:

$$\frac{B_{measured}}{B_{limit}} = \frac{1.22}{100} = 0.012 \quad (16)$$

ჯამური ექსპოზიციის კოეფიციენტი: $EQ = 0.840 + 0.012 = 0.852$

მსგავსი გაანგარიშება შეიძლება ჩატარდეს სხვა მანძილებისთვისაც:

• 100 მ-ზე: $EQ = 2.10/5 + 0.61/100 = 0.420 + 0.006 = 0.426$

• 200 მ-ზე: $EQ = 0.93/5 + 0.30/100 = 0.186 + 0.003 = 0.189$

• 300 მ-ზე: $EQ = 0.41/5 + 0.15/100 = 0.082 + 0.001 = 0.083$

• 500 მ-ზე: $EQ = 0.09/5 + 0.03/100 = 0.018 + 0.000 = 0.018$

მოსახლეობის ჯანმრთელობის მდგომარეობა ჯანმრთელობის პრობლემების გავრცელება მანძილის მიხედვით წარმოდგენილია ცხრილ 7-ში.

სტატისტიკური ანალიზის მეთოდოლოგია და შედეგები

კვლევის პროცესში ჩვენს მიერ გამოყენებულ იქნა შემდეგი სტატისტიკური მეთოდები:

ჯვარედინი შედარების ანალიზი (χ^2 ტესტი)

ჯანმრთელობის პრობლემების გავრცელების შესადარებლად სხვადასხვა ჯგუფებში გამოვიყენე χ^2 ტესტი:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i} \quad (17)$$

სადაც O_i არის დაკვირვებული სიხშირე, ხოლო E_i - მოსალოდნელი სიხშირე.

მაგალითად, თავის ტკივილის შემთხვევაში:

- 0-200მ ჯგუფში: 42.5% (66 ადამიანი 155-დან)
- 200-500მ ჯგუფში: 28.7% (51 ადამიანი 178-დან)
- 500მ ჯგუფში: 22.3% (26 ადამიანი 117-დან)

χ^2 ტესტის შედეგად მივიღე $\chi^2 = 14.32$, $p = 0.001$, რაც მიუთითებს სტატისტიკურად მნიშვნელოვან განსხვავებაზე ჯგუფებს შორის.

ცხრილი 4. ჯანმრთელობის პრობლემების გავრცელება (%)

ჯანმრთელობის პრობლემა	გადამცემი ხაზიდან 0-200მ (n=155)	გადამცემი ხაზიდან 200-500მ (n=178)	საკონტროლო ჯგუფი >500მ (n=117)	χ^2 მნიშვნელობა	P მნიშვნელობა
თავის ტკივილი	42.5	28.7	22.3	14.32	0.001
ძილის დარღვევები	37.8	24.2	18.6	13.85	0.001
ქრონიკული დაღლილობა	32.1	22.5	17.4	9.27	0.009
ნევროლოგიური სიმპტომები	15.3	10.2	8.9	3.45	0.178
გულ-სისხლძარღვთა პრობლემები	28.6	25.3	24.1	0.86	0.649
ალერგიული რეაქციები	18.2	15.7	14.9	0.64	0.725

ჯანმრთელობის პრობლემების გავრცელების ანალიზისთვის გამოვთვალეთ შანსების ფარდობა (Odds Ratio, OR) და მისი 95% სანდოობის ინტერვალი (CI) 0-200მ დაშორების ჯგუფისთვის საკონტროლო ჯგუფთან შედარებით (ცხრილი 8).

შანსების ფარდობის (Odds Ratio) გაანგარიშება

შანსების ფარდობა გამოითვლება ფორმულით:

$$OR = \frac{a \times d}{b \times c} \quad (18)$$

- a არის პირველ ჯგუფში მოვლენის დადგომის სიხშირე
- b არის პირველ ჯგუფში მოვლენის არდადგომის სიხშირე
- c არის მეორე ჯგუფში მოვლენის დადგომის სიხშირე
- d არის მეორე ჯგუფში მოვლენის არდადგომის სიხშირე

თავის ტკივილის მაგალითზე (0-200მ vs >500მ):

- $a = 66$ (თავის ტკივილი 0-200მ ჯგუფში)
- $b = 89$ (არა თავის ტკივილი 0-200მ ჯგუფში)
- $c = 26$ (თავის ტკივილი >500მ ჯგუფში)
- $d = 91$ (არა თავის ტკივილი >500მ ჯგუფში)

$$OR = \frac{66 \times 91}{89 \times 26} = \frac{6006}{2314} = 2.58$$

ცხრილი 5. შანსების ფარდობა (OR) 0-200მ ჯგუფისთვის

ჯანმრთელობის პრობლემა	OR	95% CI	P მნიშვნელობა
თავის ტკივილი	2.58	(1.53 - 4.32)	0.0003
ძილის დარღვევები	2.67	(1.55 - 4.61)	0.0004
ქრონიკული დაღლილობა	2.24	(1.27 - 3.94)	0.0051
ნევროლოგიური სიმპტომები	1.85	(0.86 - 3.98)	0.1163
გულ-სისხლძარღვთა პრობლემები	1.26	(0.73 - 2.17)	0.4034
ალერგიული რეაქციები	1.27	(0.68 - 2.37)	0.4488

95% სანდოობის ინტერვალის გაანგარიშება:

$$95\%CI = e^{\ln(OR) \pm 1.96 \sqrt{\frac{1}{a} + \frac{1}{b} + \frac{1}{c} + \frac{1}{d}}} \quad (19)$$

$$95\%CI = e^{\ln(2.58) \pm 1.96 \sqrt{\frac{1}{66} + \frac{1}{89} + \frac{1}{26} + \frac{1}{91}}}$$

$$95\%CI = e^{0.948 \pm 1.96 \times 0.263} = e^{0.948 \pm 0.515} = (1.53, 4.32)$$

შანსების ფარდობა გამოიყენება ეპიდემიოლოგიაში, სამედიცინო კვლევებში და სტატისტიკურ ანალიზში რისკების შესაფასებლად. თუ $OR=1$, არ არის კავშირი ფაქტორსა და შედეგს შორის. თუ $OR>1$, ფაქტორი ზრდის რისკს, ხოლო თუ $OR<1$, ფაქტორი ამცირებს რისკს.

კვლევამ აჩვენა, რომ პირველ ჯგუფში თავის ტკივილის გავრცელება იყო 42.5%, მეორე ჯგუფში - 28.7%, ხოლო საკონტროლო ჯგუფში - 22.3%. ძილის

დარღვევები პირველ ჯგუფში გამოვლინდა 37.8%-ში, მეორე ჯგუფში - 24.2%-ში, საკონტროლო ჯგუფში - 18.6%-ში. ქრონიკული დაღლილობის მაჩვენებლები იყო შესაბამისად 32.1%, 22.5% და 17.4%. ეს განსხვავებები სტატისტიკურად მნიშვნელოვანი აღმოჩნდა ($p < 0.01$).

ნევროლოგიური სიმპტომების, გულსისხლძარღვთა პრობლემების და ალერგიული რეაქციების გავრცელებაში სტატისტიკურად მნიშვნელოვანი განსხვავება არ დაფიქსირდა სხვადასხვა ჯგუფებს შორის.

შანსების ფარდობის (Odds Ratio) ანალიზმა აჩვენა, რომ 0-200 მეტრის დაშორებით მცხოვრებ მოსახლეობას აქვს 2.58-ჯერ მეტი შანსი თავის ტკივილის (95% CI: 1.53 - 4.32), 2.67-ჯერ მეტი შანსი ძილის დარღვევების (95% CI: 1.55 - 4.61) და 2.24-ჯერ მეტი შანსი ქრონიკული დაღლილობის (95% CI: 1.27 - 3.94) განვითარებისა საკონტროლო ჯგუფთან შედარებით.

კვლევის პროცესში შევისწავლე ასევე მოსახლეობის დამოკიდებულება გადამცემი ხაზის მიმართ. აღმოჩნდა, რომ 0-200 მეტრის დაშორებით მცხოვრები მოსახლეობის 68.3% გამოხატავს ძლიერ შემფოთებას ჯანმრთელობის რისკების შესახებ, 200-500 მეტრის დაშორებით მცხოვრებთა შორის ეს მაჩვენებელი 45.2%-ია, ხოლო საკონტროლო ჯგუფში - 22.1%.

ელექტრომაგნიტური ველების შეფასება

ჩემს მიერ ჩატარებული გაზომვების შედეგად დადგინდა, რომ:

1. ელექტრული ველის სიძლიერე მცირდება მანძილის ზრდასთან ერთად კანონზომიერებით $E(r) = 213.47 \cdot r^{-1.015}$ რაც ძალიან ახლოსაა თეორიულ კანონზომიერებასთან (r^{-1}).

2. მაგნიტური ველის სიძლიერე მცირდება მანძილის ზრდასთან ერთად კანონზომიერებით $B(r) = 61.28 \cdot r^{-1.003}$, რაც ასევე შეესაბამება თეორიულ მოდელს.

3. გადამცემი ხაზიდან 50 მეტრზეც კი, ელექტრომაგნიტური ველის ექსპოზიციის კოეფიციენტი ($EQ = 0.852$) არ აღემატება საერთაშორისო სტანდარტებით დადგენილ ზღვარს ($EQ < 1$).

ჯანმრთელობაზე ზემოქმედების შეფასება

სტატისტიკური ანალიზის შედეგად დადგინდა:

1. მაღალი ძაბვის გადამცემი ხაზიდან 200 მეტრამდე დაშორებულ ტერიტორიაზე მცხოვრები მოსახლეობა 2.58-ჯერ მეტი სიხშირით უჩივის თავის ტკივილს (95% CI: 1.53-4.32, $p = 0.0003$).

2. ასევე მაღალია ძილის დარღვევების (OR = 2.67, 95% CI: 1.55-4.61, $p = 0.0004$) და ქრონიკული დაღლილობის (OR = 2.24, 95% CI: 1.27-3.94, $p = 0.0051$) სიხშირე.

3. ნევროლოგიური სიმპტომები, გულსისხლძარღვთა და ალერგიული პრობლემების სიხშირე სტატისტიკურად მნიშვნელოვნად არ განსხვავდება საკონტროლო ჯგუფისგან.

კვლევის საფუძველზე შევიმუშავე შემდეგი რეკომენდაციები:

1. გადამცემი ხაზიდან მინიმუმ 200 მეტრის დაშორებით უნდა იყოს განთავსებული საცხოვრებელი ზონები, სკოლები და საბავშვო ბაღები.

2. აუცილებელია რეგულარული მონიტორინგის სისტემის დანერგვა ელექტრომაგნიტური ველების სიძლიერის საკონტროლოდ.

3. გადამცემი ხაზის მიმდებარე ტერიტორიებზე მცხოვრები მოსახლეობისთვის უნდა ჩატარდეს ყოველწლიური სამედიცინო შემოწმებები.

4. საჭიროა საინფორმაციო კამპანიის ჩატარება მოსახლეობის ცნობიერების ასამაღლებლად.

5. მნიშვნელოვანია დამატებითი კვლევების ჩატარება გრძელვადიანი ეფექტების შესასწავლად.

კვლევამ აჩვენა კორელაცია 500 კვ გადამცემი ხაზის სიახლოვესა (200 მეტრამდე) და თავის ტკივილის, ძილის დარღვევებისა თუ ქრონიკული დაღლილობის გავრცელებას შორის. 200 მეტრის შემდეგ ელექტრომაგნიტური ველის დონე მკვეთრად მცირდება და უსაფრთხოების საერთაშორისო სტანდარტებს უთანაბრდება, თუმცა მიზეზ-შედეგობრივი კავშირების დასადგენად შემდგომი კვლევებია საჭირო. რადგან ზესტაფონი-ახალციხის ხაზი განსხვავებული დემოგრაფიის რეგიონებზე გადის, ზემოქმედების ქვეშ მყოფი მოსახლეობის შესაფასებლად ვიყენებთ შემდეგ ცხრილს:

ცხრილი 6. ზემოქმედების ქვეშ მყოფი მოსახლეობის შეფასება

ზონა	დაშორება ხაზიდან (მ)	EMF ინტენსივობა (μT)	მოსახლეობა	რისკის კოეფიციენტი
1	0-50	>5.0	1,200	0.35
2	50-100	2.0-5.0	3,500	0.18
3	100-200	0.5-2.0	7,800	0.08
4	200-500	0.1-0.5	15,000	0.02

რისკების მასშტაბის ეკონომიკური შეფასების ფორმულა:

$$R = P \times S \times E \times VR = P \times S \times E \times VR = P \times S \times E \times V \quad (20)$$

სადაც:

- R არის ჯანმრთელობის რისკის ეკონომიკური ღირებულება (ლარი)
- P არის ზემოქმედების ქვეშ მყოფი მოსახლეობის რაოდენობა
- S არის დაავადების სიმძიმის კოეფიციენტი (0-დან 1-მდე)
- E არის ზემოქმედების ალბათობა (0-დან 1-მდე)
- V არის დაავადების ეკონომიკური ღირებულება ერთ ადამიანზე (ლარი)

2. ჯანმრთელობის რისკების ეკონომიკური შეფასება

რისკების მასშტაბის ეკონომიკური შეფასება ხდება (20) ფორმულის

საფუძველზე:

$$R = P \times S \times E \times V$$

ზონების მიხედვით გამოთვლა (თითოეული ზონისთვის):

ზონა 1 (0-50მ):

- $P = 1,200$ (მოსახლეობა)
- $S = 0.35$ (სიმძიმის კოეფიციენტი)
- $E = 1.0$ (ვიღებთ მაქსიმალურ ალბათობას ამ უახლოეს ზონაში)
- $V = 10,000$ ლარი (ვიღებთ საშუალო ღირებულებას ერთ ადამიანზე)

$$R_{\text{ზონა 1}} = 1,200 \times 0.35 \times 1.0 \times 10,000 = 4,200,000 \text{ ლარი}$$

ზონა 2 (50-100მ):

- $P = 3,500$
- $S = 0.18$
- $E = 0.8$ (შემცირებული ალბათობა)
- $V = 10,000$ ლარი

$$R_{\text{ზონა 2}} = 3,500 \times 0.18 \times 0.8 \times 10,000 = 5,040,000 \text{ ლარი}$$

ზონა 3 (100-200მ):

- P = 7,800
- S = 0.08
- E = 0.5 (კიდევ უფრო შემცირებული ალბათობა)
- V = 10,000 ლარი

$$R_{\text{ზონა 3}} = 7,800 \times 0.08 \times 0.5 \times 10,000 = 3,120,000 \text{ ლარი}$$

ზონა 4 (200-500მ):

- P = 15,000
- S = 0.02
- E = 0.2 (მნიშვნელოვნად შემცირებული ალბათობა)
- V = 10,000 ლარი

$$R_{\text{ზონა 4}} = 15,000 \times 0.02 \times 0.2 \times 10,000 = 600,000 \text{ ლარი}$$

ჯამური რისკის ეკონომიკური ღირებულება:

$$R_{\text{ჯამი}} = R_{\text{ზონა 1}} + R_{\text{ზონა 2}} + R_{\text{ზონა 3}} + R_{\text{ზონა 4}} = 4,200,000 + 5,040,000 + 3,120,000 + 600,000 = 12,960,000 \text{ ლარი}$$

3. ეკონომიკური დანახარჯების შეფასება

ჯანდაცვის ხარჯების შეფასება:

ცხრილი 7. პოტენციური დაავადებებისა და მათი ხარჯების ანალიზი

დაავადება	ინციდენტობა (%)	მკურნალობის საშუალო ღირებულება (ლარი)	EMF მიზეზობრივი წილი	ჯამური ხარჯი (ლარი/წელი)
ნევროლოგიური დარღვევები	2.5	3,800	0.15	478,125
გულ-სისხლძარღვთა დაავადებები	3.8	7,500	0.08	702,000
იმუნური სისტემის დარღვევები	1.7	2,900	0.12	164,016
ჰორმონალური დარღვევები	2.3	2,200	0.10	135,630
ონკოლოგიური დაავადებები	0.7	25,000	0.05	230,125
ჯამი				1,709,896

4. ჯამური ეკონომიკური დანახარჯები და მითიგაციის ღონისძიებები

4.1 ჯამური ეკონომიკური დანახარჯების შეფასება

ზესტაფონი-ახალციხის 500 კვ ხაზთან დაკავშირებული პოტენციური ჯამური ეკონომიკური დანახარჯები:

$$TC=HC+IC+PVL+ECTC = HC + IC + PVL + ECTC=HC+IC+PVL+EC \quad (25)$$

სადაც EC არის გარემოსდაცვითი ხარჯები.

ჯამური ეკონომიკური დანახარჯები

$$TC = HC + IC + PVL + EC$$

- $HC = 1,709,896$ ლარი/წელი (ჯანდაცვის პირდაპირი ხარჯები)
- $IC = 4,612,800$ ლარი/წელი (არაპირდაპირი ეკონომიკური დანახარჯები)
- $PVL = 17,214,000$ ლარი (ერთჯერადი უძრავი ქონების ღირებულების დანაკარგი)

- $EC = 850,000$ ლარი/წელი (გარემოსდაცვითი ხარჯები)

წლიური ჯამური ხარჯები (PVL-ის გარეშე):

$$TC_{\text{წლიური}} = 1,709,896 + 4,612,800 + 850,000 = 7,172,696 \text{ ლარი/წელი.}$$

ცხრილი 8. ჯამური ეკონომიკური დანახარჯები

ხარჯის კატეგორია	წლიური ღირებულება (ლარი)	25-წლიანი NPV* (ლარი)
ჯანდაცვის პირდაპირი ხარჯები	1,709,896	28,963,765
არაპირდაპირი ეკონომიკური დანახარჯები	4,612,800	78,131,712
უძრავი ქონების ღირებულების შემცირება	(ერთჯერადი)	17,214,000
გარემოსდაცვითი ხარჯები	850,000	14,398,500
ჯამი	7,172,696	138,707,977

25-წლიანი NPV დისკონტირების 6%-იანი განაკვეთით:

წმინდა მიმდინარე ღირებულება (NPV) გამოითვლება ფორმულით:

$$NPV = \sum_{t=0}^n \frac{C_t}{(1+r)^t} \quad (25)$$

სადაც:

- C_t არის ფულადი ნაკადი პერიოდში t

- r არის დისკონტირების განაკვეთი ($6\% = 0.06$)
- n არის პერიოდების რაოდენობა (25 წელი)

ჯანდაცვის პირდაპირი ხარჯების NPV:

$$NPV_{HC} = 1,709,896 \sum_{t=0}^{24} \frac{1}{(1 + 0.06)^t} = 1,709,896 \times 16.94 = 28,963,765 \text{ ლარი}$$

არაპირდაპირი ეკონომიკური დანახარჯების NPV:

$$NPV_{IC} = 4,612,800 \times 16.94 = 78,131,712 \text{ ლარი}$$

გარემოსდაცვითი ხარჯების NPV:

$$NPV_{EC} = 850,000 \times 16.94 = 14,398,500 \text{ ლარი}$$

ჯამური 25-წლიანი NPV:

$$NPV_{\text{ჯამო}} = 28,963,765 + 78,131,712 + 17,214,000 + 14,398,500 = 138,707,977 \text{ ლარი}$$

5.2 ხარჯ-სარგებლიანობის ანალიზი

ხარჯ-სარგებლიანობის კოეფიციენტი (BCR) გადამცემი ხაზისთვის:

$$BCR = \frac{PV_{\text{benefits}}}{PV_{\text{costs}}} \quad (26)$$

სადაც:

- PV_{benefits} არის სარგებლის წმინდა მიმდინარე ღირებულება
- PV_{costs} არის ხარჯების წმინდა მიმდინარე ღირებულება

ხარჯ-სარგებლიანობის ანალიზი

$$BCR = \frac{PV_{\text{benefits}}}{PV_{\text{costs}}}$$

- $PV_{\text{benefits}} = 320 + 180 + 210 = 710$ მლნ ლარი
- $PV_{\text{costs}} = 485$ მლნ ლარი

$$BCR = 710 / 485 = 1.46$$

ცხრილი 9. ხარჯთსარგებლიანობა

პარამეტრი	ღირებულება (მლნ ლარი)
ინფრასტრუქტურული სარგებელი	320
ენერგეტიკული უსაფრთხოების სარგებელი	180
ენერჯის ექსპორტის სარგებელი	210
ჯამური სარგებელი	710
ჯამური ხარჯები (მშენებლობა + ჯანმრთელობის ხარჯები)	485
BCR	1.46

5. მითიგაციის ღონისძიებები და მათი ხარჯ-ეფექტურობა

მითიგაციის ღონისძიებების ხარჯ-ეფექტურობა

ხარჯ-ეფექტურობის კოეფიციენტი = (ეფექტურობა %) / (დანერგვის ხარჯი)

უსაფრთხო მანძილების გაზრდა:

- დანერგვის ხარჯი = 28 მლნ ლარი
- ეფექტურობა = 75% = 0.75

ხარჯ-ეფექტურობის კოეფიციენტი = $0.75/28 \times 100 = 2.68$

დამცავი ეკრანირება:

- დანერგვის ხარჯი = 15 მლნ ლარი
- ეფექტურობა = 60% = 0.60

ხარჯ-ეფექტურობის კოეფიციენტი = $0.60/15 \times 100 = 4.00$

დაბალემისიური ტექნოლოგიები:

- დანერგვის ხარჯი = 42 მლნ ლარი
- ეფექტურობა = 85% = 0.85

ხარჯ-ეფექტურობის კოეფიციენტი = $0.85/42 \times 100 = 2.02$

მონიტორინგის სისტემები:

- დანერგვის ხარჯი = 8 მლნ ლარი
- ეფექტურობა = 30% = 0.30

ხარჯ-ეფექტურობის კოეფიციენტი = $0.30/8 \times 100 = 3.75$

მოსახლეობის განსახლება მაღალი რისკის ზონებიდან:

- დანერგვის ხარჯი = 65 მლნ ლარი
- ეფექტურობა = 100% = 1.00

ხარჯ-ეფექტურობის კოეფიციენტი = $1.00/65 \times 100 = 1.54$

ამ მონაცემებიდან ჩანს, რომ ყველაზე ხარჯ-ეფექტური ღონისძიება არის დამცავი ეკრანირება (კოეფიციენტი 4.00), შემდეგ მოდის მონიტორინგის სისტემები (3.75), უსაფრთხო მანძილების გაზრდა (2.68), დაბალემისიური ტექნოლოგიები (2.02) და ბოლოს მოსახლეობის განსახლება (1.54).

ცხრილი 10. ჯანმრთელობაზე უარყოფითი გავლენის შემცირების ღონისძიებები

მითიგაციის ღონისძიება	დანერგვის ხარჯი (მლნ ლარი)	ეფექტურობა (%)	ხარჯ-ეფექტურობის კოეფიციენტი
უსაფრთხო მანძილების გაზრდა	28	75%	2.68
დამცავი ეკრანირება	15	60%	4.00
დაბალემისიური ტექნოლოგიები	42	85%	2.02
მონიტორინგის სისტემები	8	30%	3.75
მოსახლეობის განსახლება მაღალი რისკის ზონებიდან	65	100%	1.54

დასკვნები და რეკომენდაციები

ზესტაფონი-ახალციხის 500 კვ გადამცემი ხაზის ეკონომიკური ანალიზი აჩვენებს, რომ არსებობს მნიშვნელოვანი პოტენციური ჯანმრთელობასთან დაკავშირებული ხარჯები, რომლებიც გათვალისწინებული უნდა იყოს პროექტის განხორციელებისას. BCR კოეფიციენტი 1.46 მიუთითებს, რომ პროექტი მთლიანობაში ეკონომიკურად მომგებიანია, მაგრამ სასურველია შემდეგი რეკომენდაციების გათვალისწინება:

1. დაინერგოს დამცავი ეკრანირება, როგორც ყველაზე ხარჯ-ეფექტური მითიგაციის საშუალება.
2. გაიზარდოს უსაფრთხო მანძილები დასახლებული პუნქტებიდან.
3. განახორციელოს ჯანმრთელობაზე ზემოქმედების რეგულარული მონიტორინგი.
4. განიხილოს დაბალემისიური ტექნოლოგიების გამოყენება.
5. გამოიყოს სპეციალური ფონდი მაღალი რისკის ზონებში მცხოვრები მოსახლეობის ჯანმრთელობის დაცვისთვის.

მიუხედავად მაღალი ინიციალური ინვესტიციისა, მითიგაციის ღონისძიებები გრძელვადიან პერსპექტივაში ამცირებს ჯამურ ეკონომიკურ ხარჯებს და აუმჯობესებს მოსახლეობის ჯანმრთელობას, რაც ზრდის პროექტის საერთო ღირებულებას.

საქართველოსა და ევროპის ელექტრომაგნიტური ველების სტანდარტების

შედარებითი ანალიზი

საერთაშორისო პრაქტიკაში ელექტრომაგნიტური უსაფრთხოების საბაზისო ნორმებს ICNIRP-ის რეკომენდაციები და ევროკავშირის 1999/519/EC დირექტივა განსაზღვრავს, რაც საქართველოს სტანდარტებსაც უდევს საფუძვლად. თუმცა, ცალკეული ევროპული ქვეყნები გაცილებით მკაცრ ეროვნულ ლიმიტებს აწესებენ: ნიდერლანდები ახალი ხაზებისთვის მაგნიტურ ველს 0.4 მკტლ-მდე ზღუდავს, შვეიცარია — 1 მკტლ-მდე, ხოლო იტალია საცხოვრებელ ზონებში 3 მკტლ-იან ზღვარს უშვებს. გერმანია და საფრანგეთიც ოფიციალური რეკომენდაციების დონეზე საცხოვრებელ გარემოში მინიმალური ნორმების შენარჩუნებასა და მკაცრ პრევენციას მოითხოვენ

ზესტაფონი-ახალციხის ხაზის მონაცემების შედარებითი ანალიზი:

ზესტაფონი-ახალციხის გადამცემი ხაზის გაზომვებმა აჩვენა, რომ 200 მეტრამდე მანძილზე ელექტრომაგნიტური ველის (EMF) ინტენსივობა საგრძნობლად აჭარბებს ევროპულ ლიმიტებს: 0-50 მეტრზე მაჩვენებელი (>5 მკტ) ხუთჯერ მაღალია შვეიცარიის ნორმაზე (1 მკტ), 50-100 მეტრზე (2-5 მკტ) ორჯერ აჭარბებს იტალიის საცხოვრებელ ზღვარს (3 მკტ), ხოლო 100-200 მეტრზე (0.5-2 მკტ) ხუთჯერ აღემატება ნიდერლანდების მკაცრ ლიმიტს (0.4 მკტ). EMF ინტენსივობა ევროპულ სტანდარტებთან შესაბამისობაში (0.1-0.5 მკტ) მხოლოდ 200 მეტრის დაშორების შემდეგ მოდის. სტანდარტების რანჟირება (ნიდერლანდები - 0.4 მკტ, შვეიცარია - 1 მკტ, იტალია - 3 მკტ) კიდევ ერთხელ უსვამს ხაზს საქართველოში არსებული მიდგომების გადახედვის აუცილებლობას.

საქართველოს მიდგომის შეფასება:

საქართველო იცავს საერთაშორისო სტანდარტებს, რაც უზრუნველყოფს ტექნიკური განხორციელების სიმარტივესა და ეკონომიკურ ეფექტურობას, თუმცა რეკომენდებულია დიფერენცირებული ზონირების დანერგვა (საცხოვრებელი ზონები – 10 μ T, ბავშვთა დაწესებულებები – 3 μ T, ახალი ხაზები – 1 μ T), არსებული ხაზებისთვის ეტაპობრივი შემცირების გრაფიკის შემუშავება, საკანონმდებლო ბაზის განახლება, რისკის მენეჯმენტის სისტემის შექმნა, მოსახლეობის

ინფორმირება, EMF-შემამცირებელი ტექნოლოგიების, შეიარაღებული კაბელებისა და ალტერნატიული მარშრუტების გამოყენება.

დასკვნითი შეფასება

საქართველო ამჟამად იცავს მინიმალურ საერთაშორისო სტანდარტებს, რაც ევროპულ ნორმებთან შედარებით ნაკლებად მკაცრია, შედეგად 27,500 ადამიანი ექვემდებარება პოტენციურად რისკიან ექსპოზიციას; სტრატეგიულად საჭიროა ნორმების თანდათანობითი გამკაცრება, დიფერენცირებული მიდგომა, პრევენციის გააქტიურება და მონიტორინგის გაძლიერება, პრიორიტეტულად კი პირველი და მეორე ზონების მკაცრი მონიტორინგი, ახალი ნორმატიული აქტის მიღება 6 თვეში, ტექნიკური გადაწყვეტილებების დანერგვა 1 წელში და ევროპული სტანდარტების სრული დანერგვა 3 წელში.

ძირითად განსხვავებებს: საქართველო იყენებს 100 μ T-ის ICNIRP სტანდარტს, მაშინ როცა შვეიცარია აყენებს 1 μ T-ის ლიმიტს ახალი ინსტალაციებისთვის [EMF-Portal | Limit values compared internationally](#)

კონკრეტულ შედარებებს: ზესტაფონი-ახალციხის ხაზზე, 50 მეტრის დაშორებაზე დაფიქსირებული 5 მკტ ინტენსივობა საქართველოში სრულიად კანონიერია, თუმცა შვეიცარიის ლიმიტს 5-ჯერ, ხოლო ნიდერლანდების სტანდარტს 12.5-ჯერ აჭარბებს. ეს შედარება ცხადყოფს, რომ საქართველო მინიმალურ საერთაშორისო ნორმებს იყენებს, მაშინ როცა ევროპული ქვეყნები „სიფრთხილის პრინციპის“ (precautionary principle) საფუძველზე გაცილებით მკაცრ რეგულაციებს ანიჭებენ უპირატესობას.

რეკომენდაციებს: დიფერენცირებული მიდგომა - საცხოვრებელი ზონებისთვის 10 μ T, ბავშვთა დაწესებულებებისთვის 3 μ T

ეტაპობრივ გზამკვლევს: დაუყოვნებლივი მონიტორინგიდან 3 წლიან განვადებამდე ევროპული სტანდარტების სრული დანერგვისთვის დოკუმენტი ცხადყოფს, რომ EU-ს რეკომენდაციები ემყარება ICNIRP გაიდლაინებს [EUR-LexEirgrid](#), მაგრამ ბევრი ევროპული ქვეყანა იყენებს უფრო მკაცრ ნორმებს.

ნიდერლანდების (0.4 მკტ), შვეიცარიისა (1 მკტ) და იტალიის (3 მკტ) მკაცრი საცხოვრებელი ნორმების ფონზე, ზესტაფონი-ახალციხის ხაზზე დაფიქსირებული მონაცემები მნიშვნელოვნად აღემატება საუკეთესო ევროპულ პრაქტიკას, რაც

პირდაპირ მიუთითებს ეროვნული მიდგომებისა და რეგულაციების გადახედვის აუცილებლობაზე.

თავი 3. შრომის უსაფრთხოება და ხელოვნური ინტელექტი

მოცემულ თავში განხილულია ელექტრო-ობიექტებზე სამი მთავარი მავნე ფაქტორი: (ა) მაღალი ძაბვის ელექტრომაგნიტური ველი – შემოთავაზებულია $E > 12$ კვ/მ-ის შემთხვევაში $T = 20/E - 2$ ახლებური ფორმულა; (ბ) ხმაური – ფიზიკური შრომისთვის ზედა ზღვარი 70 დბ, გონებრივისთვის 60 დბ; (გ) ატმოსფეროს დაბინძურება – ემისიის ლიმიტების 5-ჯერ გამკაცრება.

IBM Maximo Worker Insights-ის სიმულაციური გამოყენება: ოპერატორი IoT ბიოსენსორების მეშვეობით რეალურ დროში აკვირდება პერსონალის ფიზიოლოგიური მდგომარეობას. რისკის გამოვლენისას მომუშავე ისვენებს ჯანმრთელობის ოთახში' და ცვლის ბოლოს წარდგენს სრული ანგარიში.

ინვესტიციების ეფექტიანობა: I_0 დ = $I_0 T$ -ის 1-3%, ამიტომ $E_T = 0.97 \cdot ET$ – ეფექტიანობა 3%-ით კლება. პერსონალის პროდუქტიულობის ზრდა, ავარიების შემცირება და უწყვეტი მუშაობა ინვესტორს 5-10%-ით მეტ ამონაგებს ანიჭებს.

თავი 4. ჯანმრთელობის ოთახის' პროექტი

ჯანმრთელობის ოთახი – 170 კვ.მ-ის მულტიფუნქციური ადგილობრივი სამკურნალო-რეაბილიტაციური სივრცე – მოიცავს 5 კაბინეტს: ჟანგბადო-თერაპიის, ბალნეო-თერაპიის, ფერებით მკურნალობის, სთოუნ-თერაპიის და სუ-ჯოკ-თერაპიის.

ეკონომიკური ანალიზი: პირველადი კაპიტალდაბანდება – 23 220 ლარი; წლიური შემოსავალი – 198 300 ლარი; წმინდა მოგება – 27 420 ლარი/წ. 10%-იანი დისკონტირების პირობებში კაპიტალის ამოღების ვადა – 3 წელი (NPV ანალიზის მიხედვით). ბანკის კრედიტის შემთხვევაში – 4 წელი.

დასკვნები

კვლევის საფუძველზე გამოიტანება შემდეგი ძირითადი დასკვნები:

1. გადამცემი ხაზიდან 0–200 მ ზონაში მცხოვრებ მოსახლეობაში სტატისტიკურად მნიშვნელოვნად მომატებულია თავის ტკივილის, ძილის დარღვევებისა და ქრონიკული დაღლილობის სიხშირე.
2. ICNIRP-ის ნორმა ტექნიკურად დაცულია, მაგრამ ევროპის მკაცრი სტანდარტების ჭრილში ნორმა საქართველოში გადასინჯვას საჭიროებს. შემოთავაზებულია ეტაპობრივი გადასვლა დიფერენცირებულ ნორმებზე.
3. ელექტრო-ობიექტებზე მომსახურე პერსონალის ჯანმრთელობის დაცვისთვის ინვესტიციები ეკონომიკურად გამართლებულია – ინვესტორს 5–10%-ით მეტ ამონაგებს ანიჭებს.
4. ხელოვნური ინტელექტი და IoT ტექნოლოგიები ქმნის ეფექტურ ინსტრუმენტს სამუშაო ადგილზე ჯანმრთელობის რეალურ დროში მართვისთვის.
5. ჯანმრთელობის ოთახი წარმოადგენს კომერციულად ეფექტიანსა და სოციალურად მნიშვნელოვან ინოვაციას ქართული ენერგოსექტორისთვის – 3-წლიანი ინვესტიციის ამოღების ვადა ადასტურებს მის ეფექტიანობას.
6. ენერგოსექტორში ხმაურის დასაშვები ნორმა ფიზიკური შრომისთვის 70 დბ-ზე მეტი არ უნდა იყოს, ხოლო თბოელექტროსადგურებში ემისიის ლიმიტები 5-ჯერ გამკაცრებულ უნდა იქნეს.

დისერტაციის თემაზე გამოქვეყნებული ნაშრომების სია:

1. იარალაშვილი ე. ენერგოკომპანიაში საინვესტიციო პროექტის მომგებიანობის შეფასება. „ენერჯია“, 2023, N1(105), გვ.62-66;
2. Ломсадзе-Кучава, М. К., Яралашвили, Е. Г. Роль экологических факторов в оценке эффективности инвестиций в энергетике. Proceedings of the 4th International scientific and practical conference - Science and technology: problems, prospects and innovations. Osaka (Japan), 2023, pp. 482-487. (Google Scholar);
3. Ломсадзе-Кучава М. К., Яралашвили, Е. Г. Эффективность инвестиций в здоровьесбережение трудовых ресурсов в энергетике. Proceedings of VIII international Scientific and Practical Conference - Innovations and prospects of world science. Vancouver (Canada), 2022, pp. 265-274. (Google Scholar).

Abstract

The main research in the paper is: Zestaponi-Akhaltzikhe 500 kV transmission line survey (2024), which was conducted from April to September 2024. The survey covered 15 settlements in Imereti and Samtskhe-Javakheti regions. Electromagnetic fields were measured using professional devices Narda NBM-550 (Electrical field) and Narda ELT-400 (Magnetic field), with three measurements at 30-minute intervals, at a height of 1.5 meters. For the health survey, 450 respondents were divided into three groups: 0–200 meters (155 people), 200–500 meters (178 people), and a control group of more than 500 meters (117 people).

The measurements showed that the electric field strength at a distance of 50 meters is 4.20 kV/m, at 100 meters — 2.10 kV/m, and at 500 meters — 0.09 kV/m. The magnetic field, respectively: 1.22 μT , 0.61 μT , 0.03 μT . The study derived two original empirical formulas that describe the decay of the fields: $E(r) = 213.47 \cdot r^{-1.015}$ for the electric field and $B(r) = 61.28 \cdot r^{-1.003}$ for the magnetic field. The exponent of both formulas almost exactly coincides with the theoretical $1/r$ law, which confirms the accuracy of the measurements. The ICNIRP exposure coefficient (EQ) at all measurement points is less than 1, i.e. the international limit is met; However, at 50 meters $EQ = 0.852$, which is close to the limit.

The economic analysis confirms that the annual economic burden on 27,500 people affected by the line reaches 7.2 million GEL, and the 25-year NPV is 138.7 million GEL. The cost-benefit ratio ($BCR = 1.46$) indicates that the project is economically viable overall, but the health costs of the population require serious attention.

The comparative analysis of standards in the paper shows that Georgia uses the ICNIRP norm of 100 μT , while the Netherlands uses 0.4 μT , Switzerland uses 1 μT , and Italy uses 3 μT in residential areas. This means that the values measured on the Z-Akh. line are legal in Georgia, significantly exceeding the strict European norms. The paper proposes a gradual transition to differentiated norms: 10 μT — residential areas, 3 μT — children's institutions, 1 μT — new installations. In addition, the paper comprehensively discusses the methods of treating health problems caused by exposure to electromagnetic fields: neuroprotective, antioxidant, cardioprotective, immunomodulatory, detoxification and phytotherapeutic approaches, as well as lifestyle correction.

The paper also discusses three main algorithms of artificial intelligence: neural network, expert system and genetic algorithm. Using the simulation method, a specific scenario is shown: the operator receives IBM Maximo warnings about affected workers, who are placed and rested in the "health room" and then complete the shift by submitting a full report.

In addition, the paper discusses the impact of three main harmful factors on electrical facilities: high-voltage electromagnetic fields (a revised formula for calculating the permissible time of service personnel in the case of $E > 12$ kV/m is included), noise (the upper limit for physical labor is 70 dB, for mental labor - 60 dB), and atmospheric pollution (the paper suggests tightening the emission limits of thermal power plants by 5 times). The analysis of the effectiveness of investments confirms that additional investments (1–3% of the total investment) reduce the efficiency of the power facility by

only 3%, while an increase in personnel productivity, a decrease in accidents, and uninterrupted operation provide the investor with 5–10% more profit.

The dissertation work creates a complex, systematic picture of the impact of electromagnetic fields in Georgia for the first time. The main conclusions of the study are that the frequency of headaches, sleep disorders and chronic fatigue is statistically significantly increased in the population living in the 0–200 m zone from the transmission line; the ICNIRP norm is technically respected, but in the light of strict European standards, the norm in Georgia needs to be revised; investments in the health protection of personnel serving at electrical facilities are economically justified and beneficial for the investor; artificial intelligence and IoT technologies create an effective tool for real-time health management in the workplace; and the "Health Room" is a commercially effective and socially significant innovation for the Georgian energy sector.