

სამცხე-ჯავახეთის სახელმწიფო უნივერსიტეტი
ინჟინერიის, აგრარულ და საბუნებისმეტყველო მეცნიერებათა ფაკულტეტი



მთვარისა ქურციკიძე
კომპიუტერული მოდელირებით მობილური
ტელეფონის ანტენის მიერ გამოსხივებული
ელექტრომაგნიტური ველის ზეგავლენის შესწავლა
ადამიანზე სხვადასხვა სცენარში

ინფორმატიკის სადოქტორო პროგრამა
სადისერტაციო ნაშრომი შესრულებულია ინფორმატიკის დოქტორის
აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად

სამეცნიერო ხელმძღვანელი:

თამარ ნოზაძე
ფიზიკის დოქტორი, ასისტენტ პროფესორი

ახალციხე

2025

განაცხადი

მთვარისა ქურციკიძე ვაცხადებ, რომ წარმოდგენილი სადისერტაციო ნაშრომი წარმოადგენს ჩემს ორიგინალურ ნამუშევარს და არ შეიცავს სხვა ავტორების მიერ აქამდე გამოქვეყნებულ, გამოსაქვეყნებლად მიღებულ ან დასაცავად წარმოდგენილ მასალას, რომელიც ნაშრომში არ არის მოხსენებული ან ციტირებული სათანადო წესების შესაბამისად.

ხელმოწერა:

თარიღი:

ანოტაცია

კომპიუტერული მოდელირება და სიმულაცია წარმოადგენს მეთოდოლოგიურ პროცესს, რომელიც საშუალებას იძლევა რეალურ ცხოვრებაში არსებული მოვლენების მათემატიკური, გრაფიკული ან ალგორითმული ფორმით წარმოდგენას კომპიუტერულ გარემოში. შესაბამისი პროგრამული უზრუნველყოფის გამოყენებით შესაძლებელი ხდება მოდელირებული სისტემების სიმულაცია, რაც უზრუნველყოფს მათი ქცევის ანალიზს, პროგნოზირებასა და დეტალურ შესწავლას.

კომპიუტერული მოდელირების გამოყენებამ საშუალება მოგვცა ჩაგვეტარებინა იმიტირებული ექსპერიმენტები კომპიუტერული პროგრამებისა და რიცხვითი მოდელების გამოყენებით. რიცხვითი მოდელირების გზით შესაძლებელი გახდა დიდი მოცულობის მონაცემების ოპერატიული ანალიზი და პროგნოზირება, რაც რეალურ პირობებში ექსპერიმენტული გზით განხორციელების შემთხვევაში საკმაოდ რთულად შესასრულებელი იქნებოდა. ეს განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია, რადგან დისერტაციის ფარგლებში შესასწავლად შერჩეულია მეტად აქტუალური სამეცნიერო პრობლემა — საკომუნიკაციო მოწყობილობების მიერ გამოსხივებული ელექტრომაგნიტური ველების ზემოქმედებით ადამიანის ორგანიზმში წარმოქმნილი სითბური ეფექტების შეფასება.

წარმოდგენილი დისერტაციის მიზანია შეიმუშაოს და გამოიკვლიოს რეალისტური რიცხვითი მოდელები მობილური ტელეფონების ტესტირებისთვის ელექტრომაგნიტური (ემ) გამოსხივების უსაფრთხოების თვალსაზრისით. რამდენადაც, მწარმოებლების მიერ უსაფრთხოების ტესტირების პროცესში არ ხდება მობილური ტელეფონების რეალური გამოყენების პირობების, კერძოდ ტელეფონით კომუნიკაციისას ხელის ზეგავლენის გათვალისწინება.

წარმოდგენილი დისერტაციის მიზანია ასევე, აჩვენოს, მობილური ტელეფონების უსაფრთხოების ტესტირების სტანდარტში ცვლილებების შეტანის საჭიროება და ამ ცვლილებების განხორციელების შესაძლებლობების კვლევა. სასურველია მწარმოებლების მიერ, ტესტირება განხორციელდეს ადამიანის რეალისტური მოდელების გამოყენებით რიცხვითი გამოთვლების (კომპიუტერული მოდელირების) გზით გაცილებით რეალისტური სურათის წარმოსაჩენად. ნაჩვენები

იქნება, რამდენად განხორციელებადია რეალისტური რიცხვითი მოდელების კვლევა, რა სირთულეებს შეიძლება ქონდეს ადგილი, რა ეფექტები, მომენტები იჩენს თავს მოდელირების პროცესში.

დისერტაციის ფარგლებში განხორციელებული კვლევა ინოვაციურია, რადგან დასმული ამოცანის გადასაწყვეტად შეიქმნა, გრაფიკული პროგრამების გამოყენებით, ხელის რეალისტური 3D მოდელები, მობილური ტელეფონის დაჭერის რეალისტური პოზიციების გათვალისწინებით, რაც სიახლეა;

ასევე, შემუშავდა ახალი ალგორითმი/პროცედურის მონახაზი კომპიუტერული მოდელირების გზით მობილური ტელეფონის უსაფრთხოების ტესტირებისა, მათი შემდგომი სტანდარტიზაციის მიზნით.

შერჩეული საკვლევი სიხშირის შესაბამისად, 3D მოდელების შესაბამისი დისკრეტიზაციის შერჩევამ, მოდელების რთული გეომეტრიის და ქსოვილების ჰეტეროგენულობის გათვალისწინებამ, მოგვცა საშუალება მიგვეღო მაღალი სიზუსტის/სანდოობის შედეგები. აღსანიშნავია, რიცხვითი მოდელირების შესაძლებლობების უპირატესობა არსებულ სტანდარტებში გათვალისწინებული ექსპერიმენტული გაზომვების მიმართ. მოდელირების შედეგები კარგ თანხვედრაშია ექსპერიმენტულ გაზომვებთან. კომპიუტერულ მოდელირებას შეუძლია განიხილოს ადამიანის არაერთგვაროვანი მოდელები და სხვადასხვა რეალისტური სცენარები.

დისერტაციაში დასახული ამოცანები შევისწავლეთ სრულად კომპიუტერული მოდელირების გამოყენებით. რიცხვითი ექსპერიმენტები განხორციელდა ივანე ჯავახიშვილის სახელობის თბილისის სახელმწიფო უნივერსიტეტის (თსუ) გამოყენებითი ელექტროდინამიკისა და რადიოინჟინერიის ლაბორატორიაში შექმნილი პროგრამული პაკეტით FDTD Lab (FDTD მეთოდზე დაფუძნებული, ემ და თერმული სოლვერი), 1მმ დისკრეტიზაციის ქალის და ბავშვის თავის 3D (სამგანზომილებიანი) რეალისტური, არაერთგვაროვანი მოდელების ("Virtual Population", IT'IS Foundation) გამოყენებით. ადამიანის რეალისტური მოდელები, შექმნილი ხელის (სხვადასხვა პოზიციებით) მოდელები ტელეფონის მოდელთან ერთად (ტელეფონის ხელთან ერთად ადამიანის თავიდან სხვადასხვა დაშორების მანძილების გათვალისწინებით) მომზადდა/დამუშავდა და რიცხვითი სიმულაციები

განხორციელდა კვლევისთვის შერჩეული 2100 და 3700 [მგჰც] სიხშირეების შესაბამისად.

**MOBILE PHONE ANTENNA ELECTROMAGNETIC RADIATION INFLUENCE STUDY
ON HUMAN IN DIFFERENT EXPOSURE SCENARIOS BY USING COMPUTER
MODELING**

ABSTRACT

Computer modeling/simulation has allowed us to construct mathematical, graphical/algorithmic representations of real-life phenomenon on a computer and implement them using computer software to predict and study the behavior of study systems; Computer modeling has allowed us to conduct simulated experiments using computer algorithms, computer programs, and numerical models. Numerical modeling allows for rapid analysis and prediction of large volumes of data, which in our case would be difficult with real experiments. Since for dissertation is selected very relevant scientific problem related to the assessment of thermal effects caused by the impact on humans of EM fields emitted by communication devices.

The aim of the presented thesis is to develop and investigate realistic numerical models for testing mobile phones from the point of view of electromagnetic (EM) safety. Since, in the process of safety testing by manufacturers, the real conditions of use of mobile phones, in particular, the influence of the hand during telephone communication, are not taken into account.

The aim of the presented thesis is also to show the need for changes in the safety testing standard for mobile phones and to study the possibilities of implementing these changes. It is desirable for manufacturers to carry out testing using realistic human models through numerical calculations (computer modeling) to present a more realistic picture. It will be shown how feasible it is to study realistic numerical models, what difficulties may arise, what effects, moments arise in the modeling process.

The research carried out within the framework of the dissertation is innovative, because in order to solve the task set, realistic 3D models of the hand were created using graphic programs, taking into account realistic positions of holding a mobile phone, which did not

exist before; also, a new algorithm/procedure outline was developed for testing the safety of mobile phones through computer modeling, with the aim of their further standardization.

The selection of appropriate discretization of 3D models, taking into account the complex geometry of the models and the heterogeneity of tissues, allows us to obtain high-accuracy results. It is worth noting the advantage of numerical modeling capabilities over experimental measurements provided for in existing standards. The modeling results are in good agreement with experimental measurements. Computer modeling can consider non-uniform realistic human models and various realistic scenarios.

The tasks set in the dissertation were investigated entirely by means of computer modeling. Numerical experiments were conducted using the FDTD Lab software package (FDTD method-based, EM and thermal solver), developed in the Laboratory of Applied Electrodynamics and Radio Engineering of Ivane Javakhishvili Tbilisi State University (TSU), using 1-mm discretization of 3D (three-dimensional) realistic, heterogeneous models of a woman's and a child's head ("Virtual Population", IT'IS Foundation). Realistic human models, hand models (with different positions, taking into account different distances from the head model) were prepared/processed together with a phone model, and numerical modeling was performed at frequencies of 2100 and 3700 [MHz], selected for the study.

შინაარსი

ანოტაცია.....	3
ABSTRACT	6
შესავალი	10
პრობლემის აქტუალობა	10
კვლევის სიახლე, მიზანი და მნიშვნელობა.....	17
ამოცანის დასმა	21
სადისერტაციო ნაშრომის მოკლე მიმოხილვა	24
თავი I ლიტერატურული მიმოხილვა	26
შესავალი	26
1.1. ემ ველის ზემოქმედებით გამოწვეული სითბური და არასითბური ეფექტები ადამიანზე.....	27
1.2. ემ ველის გავლენა ბუნებაზე.....	32
თავი II კვლევის მეთოდოლოგია.....	35
2. 1. FDTD მეთოდი.....	35
2.1.1. YEE ალგორითმი.....	39
2. 1. 2. სასრული სხვაობები და აღნიშვნები.....	42
თავი III პროგრამული უზრუნველყოფა.....	44
3.1. პროგრამული პაკეტი - FDTD Lab	44
3. 1. 1. FDTD Lab პროგრამის მომხმარებლის ინტერფეისი	51
3. 2. ელექტრომაგნიტური და თერმული ამომხსნელი.....	86
3. 3. მიღებული შედეგების კომპიუტერული დამუშავება და ვიზუალიზაცია.....	90
MATLAB	93
თავი IV კომპიუტერული მოდელირებით ადამიანის რეალისტური რიცხვითი მოდელების კვლევა	95
შესავალი	95
4. 1. ქალის და ბავშვის არაერთგვაროვანი რიცხვითი მოდელები .	97

4. 2. სითბური პროცესების კომპიუტერული მოდელირება ქალის მოდელისათვის	116
4.3. სითბური პროცესების კომპიუტერული მოდელირება ბავშვის მოდელისათვის	131
4.4. მობილური ტელეფონების უსაფრთხოების რიცხვითი ტესტირების პროცედურის მონახაზი	143
4.4.1. ზოგადი რეკომენდაციები	145
4.4.2. დასკვნა	147
4.4.3 შედეგები გამოტანილი დაცვისათვის	150
დანართი 1.	153
FDTD Lab პროგრამული პაკეტის კოდის ფრაგმენტი	153
გამოყენებული ლიტერატურა	163
<i>ცხრილების ნუსხა</i>	170
<i>სურათების /დიაგრამების/გრაფიკების ნუსხა</i>	170
აბრევიატურები	174
Abbreviations	175

შესავალი

პრობლემის აქტუალობა

კომპიუტერული მოდელირება და სიმულაცია წარმოადგენს მეთოდოლოგიურ პროცესს, რომელიც საშუალებას იძლევა რეალურ ცხოვრებაში არსებული მოვლენების მათემატიკური, გრაფიკული ან ალგორითმული ფორმით წარმოდგენას კომპიუტერულ გარემოში. შესაბამისი პროგრამული უზრუნველყოფის გამოყენებით შესაძლებელი ხდება მოდელირებული სისტემების სიმულაცია, რაც უზრუნველყოფს მათი ქცევის ანალიზს, პროგნოზირებასა და დეტალურ შესწავლას.

კომპიუტერული მოდელირება უკანასკნელ პერიოდში ძირითად მეცნიერულ შესაძლებლობად გადაიქცა, რამდენადაც მეცნიერებს საშუალებას აძლევს ჩაატარონ ათასობით იმიტირებული ექსპერიმენტი კომპიუტერული ალგორითმების, კომპიუტერული პროგრამების და რიცხვითი მოდელების გამოყენებით. ფართოდ გამოიყენება თითქმის ყველა სამეცნიერო მიმართულებით, როგორცაა მედიცინა, ბიოლოგია, ფიზიკა, ასტრონომია და სხვ.

დისერტაციის ფარგლებში შესასწავლად შერჩეული იქნა მეტად აქტუალური სამეცნიერო პრობლემა, რომელიც დაკავშირებულია ადამიანზე საკომუნიკაციო მოწყობილობების მიერ გამოსხივებული ემ ველების ზემოქმედებით გამოწვეული სითბური ეფექტების შეფასებასთან.

თანამედროვე ცხოვრებაში მზარდი ტემპით ინერგება საკომუნიკაციო და სხვა სახის ელექტრონული მოწყობილობები, რომელთა მუშაობასაც თან ახლავს ელექტრომაგნიტური გამოსხივება. ჩვენს ირგვლივ ამ ელექტრომაგნიტური ტალღების ფონი დღითიდღე მატულობს, რაც მნიშვნელოვან შეფერხებებს უქმნის თვით ამ მოწყობილობების კორექტულ ფუნქციონირებასაც. მობილური ტელეფონების მომხმარებლების რაოდენობის მატებასთან ერთად იზრდება საბაზისო სადგურების რიცხვი, რაც თავისთავად ზრდის ელექტრომაგნიტური ველის ფონს. მეორეს მხრივ მობილური ტელეფონების მუშაობისთვის უზრუნველყოფილი უნდა იყოს კავშირის მაღალი ხარისხი. სუსტი კავშირის შემთხვევაში მოწყობილობები გადაცემის სიმძლავრეს ავტომატურად ზრდიან, რაც არასასურველ გავლენას ახდენს ახლომდებარე, როგორც ბიოლოგიურ ობიექტებზე, ასევე ელექტრონულ

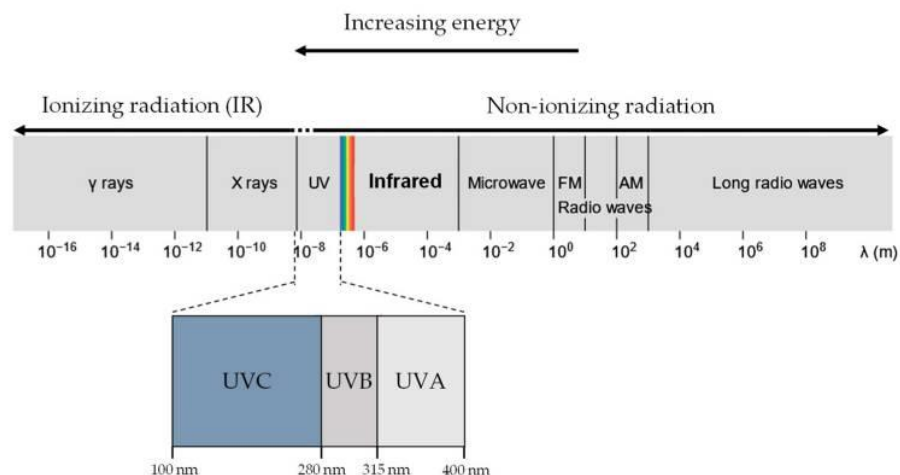
მოწყობილობებზე. ამას ემატება მრავალი სხვა ელექტრომაგნიტური გამოსხივება და ცხადია, ყოველივე ეს მოითხოვს კონტროლირებას, ვინაიდან ახლო მომავალში ასეთი ტემპით ელექტრომაგნიტური ფონის ზრდამ შეიძლება უმართავი პროცესები გამოიწვიოს (კაკულია 2003).

ძლიერი ელექტრომაგნიტური ფონი არასასურველია ელექტრონული სისტემების სრულფასოვანი მუშაობისთვის და მისი ზეგავლენა გარკვეულ წილად საფრთხეს უქმნის ადამიანის ჯანმრთელობასაც. ყველაზე მეტად ეს პრობლემა თავს იჩენს ნაწილობრივ მეტალური ზედაპირებით შემოსაზღვრულ სივრცეებში, ისეთებში როგორც არის, თანამედროვე სატრანსპორტო საშუალებები: თვითმფრინავები, ავტომობილები და ა.შ. მათი ელექტრონული სისტემები მგრძნობიარენი არიან ელექტრომაგნიტური ველის მიმართ. ამ მიზეზით თვითმფრინავით მგზავრობისას აკრძალულია ყოველგვარი პირადი მოხმარების ელექტრონული მოწყობილობებით სარგებლობა, იქნება ეს მობილური ტელეფონი, კომპიუტერი თუ სხვა სახის ელექტროსისტემა.

მობილური ტელეფონები თავდაპირველად ფართო საზოგადოებისათვის ხელმისაწვდომი გახდა შეერთებულ შტატებში 90-იანი წლებიდან. მას შემდეგ, მობილური ტელეფონების მომხმარებელთა დიდ და ჯერ კიდევ მზარდ რაოდენობასთან ერთად (როგორც მოზრდილები, ასევე ბავშვები), მკვეთრად გაიზარდა მომხმარებელთა მხრიდან მობილურ ტელეფონთან გატარებული დროის ხანგრძლივობაც, რასაც უკანასკნელ პერიოდში მნიშვნელოვნად ხელი შეუწყო 5G სისტემების დანერგვამ და გლობალურმა ეპიდემიოლოგიურმა სიტუაციამ. COVID-19-ის პანდემიამ მკვეთრად შეცვალა ადამიანების ცხოვრება მთელ მსოფლიოში. ზოგიერთი მეცნიერი ვარაუდობს, რომ მობილური მოწყობილობები კიდევ უფრო მნიშვნელოვანი გახდა COVID-19 პანდემიის დროს სოციალური თუ ბიზნეს კავშირების დასამყარებლად (David 2021). მობილური ტელეფონების პოპულარულობის ზრდის ხელშემწყობ ფაქტორად ასევე, შესაძლებელია განხილული იქნას მათი ტექნოლოგიური შესაძლებლობების და უპირატესობების განვითარება. თუმცა, ნებისმიერ ტექნოლოგიურ პროგრესს დადებითთან ერთად შეიძლება უარყოფითი შედეგებიც მოჰყვეს.

ცნობილია, რომ ელექტრომაგნიტური (ემ) გამოსხივება იქმნება ხელოვნური და ბუნებრივი წყაროებიდან. მზე, ვარსკვლავები და სხვა ემ ველის ბუნებრივ წყაროებს წარმოადგენს. მათ ბუნებრივ ელექტრომაგნიტურ ფონს ადამიანის ორგანიზმი შეგუებულია. ასევე, ემ ველის წყაროებია ელექტრული მოწყობილობები და ამ ბუნებრივი ემ ფონის „დაბინძურება“ გამოწვეულია მათი ემ ველებით. EMF-ები უხილავია და წარმოიქმნება ელექტროხაზებიდან, გადამცემი ანძებიდან, საყოფაცხოვრებო ტექნიკიდან, მობილური ტელეფონებიდან, Wi-Fi-დან და საბაზო სადგურებიდან და სხვ.

მობილური ტელეფონები აგზავნიან სიგნალებს (და იღებენ მათ) ახლომდებარე მობილური ანძების (საბაზისო სადგურების) რადიოსიხშირული (RF) ტალღების გამოყენებით (სურ. 1). ხილული სინათლის მსგავსად, RF ტალღები არის არამაიონიზებელი გამოსხივების ფორმა. მათ არ აქვთ საკმარისი ენერგია უჯრედების შიგნით არსებული დნმ-ის (გენების) უშუალო დაზიანებით კიბოს გამოწვევის. RF ტალღები განსხვავდება უფრო ძლიერი (მაიონიზებელი) გამოსხივებისაგან, როგორიცაა რენტგენის სხივები, გამა სხივები და ულტრაიისფერი (UV) სხივები.



სურათი 1. ელექტრომაგნიტური გამოსხივების სპექტრი

მაიონიზებელ გამოსხივებას შეუძლია დაარღვიოს დნმ-ის ქიმიური ბმები, რამაც შეიძლება გამოიწვიოს კიბო, ან ჯანმრთელობის სერიოზული პრობლემები. ელექტრომაგნიტური გამოსხივების სპექტრის ილუსტრაცია (სურ. 1) გვიჩვენებს ელექტრომაგნიტური ენერგიის შესაძლო სიხშირეებს, დაწყებული უკიდურესად

დაბალი სიხშირეებიდან უკიდურესად მაღალ სიხშირეებამდე (რენტგენის სხივები და გამა სხივები) და მოიცავს როგორც არამაიონიზებელ, ასევე მაიონიზებელ გამოსხივებას. მეხუთე თაობის (5G) ფიჭური ქსელები ამჟამად ინტენსიურად ინერგება შეერთებული შტატების ბევრ ნაწილში, სხვადასხვა ქვეყნებშიც მსოფლიოში და მათ შორის საქართველოშიც. 5G ქსელებს შეუძლიათ ბევრად უფრო დიდი რაოდენობით ინფორმაციის გადაცემა უფრო მოკლე დროში, ვიდრე წინა თაობებს (4G, 3G და ა.შ.).

5G ქსელები (და ტელეფონები, რომლებიც მათ იყენებენ) მუშაობენ უფრო მაღალ RF სიხშირეზე (უფრო მაღალი ენერგიის მატარებელია), ვიდრე ძველი თაობის ქსელები (თუმცა ახალი თაობის ტელეფონებს, როგორც წესი, შეუძლიათ გამოიყენონ ძველი ქსელებიც), მაგრამ უახლესი 5G ტექნოლოგიები კვლავ იყენებენ RF ტალღებს, ამიტომ ისინი ჯერ კიდევ არამაიონიზებელი გამოსხივების ფორმებს წარმოადგენენ, რომლებსაც არ აქვთ დნმ-ის უშუალო დაზიანების უნარი, ანუ საკმარისი ენერგია.

მობილური ტელეფონი რადიოსიხშირული და მიკროტალღოვანი (MW) ემ გამოსხივების წყაროა (Volkow 2011, 808–813), რომელიც კომუნიკაციისას მდებარეობს ადამიანის თავის სიახლოვეს. ყოველივემ ბუნებრივია, გამოიწვიას მომხმარებლების მხრიდან სერიოზული შეშფოთება ემ გამოსხივების ხანგრძლივი ზემოქმედებით გამოწვეული ჯანმრთელობის პოტენციური რისკების შესახებ. ყოველივემ დასაბამი მისცა ადამიანზე ელექტრომაგნიტური გამოსხივების ზემოქმედების კუთხით კვლევების დაწყებას.

მიკროტალღური და რადიოსიხშირული გამოსხივების ზეგავლენა როგორც ცნობილია, ცოცხალ ორგანიზმებში თავს იჩენს სითბური და ბიოლოგიური ეფექტების სახით. ბიოლოგიური ეფექტები შიდა ემ ველზეა დამოკიდებული. იმისათვის, რომ დავახასიათოთ შიდა ემ ველი შემოღებული იქნა სიდიდე - SAR-შთანთქმის კუთრი კოეფიციენტი (ვტ/კგ) (Liu 2016, 739-746), (Meng 2009), (Hong 2017, 2741-2761) რომელიც აჩვენებს თუ რა ენერგიის რაოდენობა შთანთქმდება მასის ერთეულის მიერ დროის ერთეულში .

$$SAR = \frac{\sigma |\vec{E}|^2}{\rho} \quad (1) \text{ (1)-ში}$$

$|\vec{E}|$ - არის ელექტრული ველის ამპლიტუდური მნიშვნელობა [V/m],

σ - ელექტრული გამტარობა [S/m],

ρ - სიმკვრივე [კგ/მ³]

SAR - შესაძლოა იყოს წერტილოვანი და ასევე, სხვადასხვა მასაზე გასაშუალოებული იმისდა მიხედვით, თუ რა მასაზე ან როგორ მოხდა მისი დათვლა (Faruque 2015). SAR-ის მნიშვნელობა მთელი სხეულისთვის შეიძლება გასაშუალოდეს ქსოვილის თითოეული ტიპის მნიშვნელობის გათვალისწინებით; ან შესაძლოა თითოეული ორგანოს/სხეულის ნაწილისათვის ლოკალიზებული მნიშვნელობების დათვლა და სხვა. SAR მაქსიმალური მნიშვნელობების გაზომვა, განაწილების დადგენა ცოცხალი ორგანიზმებისათვის რთულია და ხშირ შემთხვევაში შეუძლებელი. ამავდროულად, მაღალი (1 გჰც და ზემოთ) სიხშირეებისას ადამიანის ქსოვილების მაღალი შთანთქმის შედეგად, აღნიშნულ სიხშირეებზე თითქმის არ აღწევს ველი ორგანიზმში; ხელსაწყოს მიერ გამოსხივებული ემ ველის ენერგიის შთანთქმა მეტწილად ხდება სხეულის ზედაპირზე (Faruque 2015). ცოცხალ სისტემებს გააჩნიათ გარე ქმედებების შედეგების კომპენსირების უნარი ემ ველების ზემოქმედების ჩათვლით (შოშიაშვილი 2006), (ჯელაძე 2015).

ადრეულ პერიოდში ჩატარებულ კვლევებზე დაყრდნობით, შემუშავებული იქნა უსაფრთხოების ზომები, რომლებიც განსაზღვრავს ელექტრომაგნიტური ველების ზემოქმედების მაქსიმალურ დასაშვებ დონეებს. რეკომენდაციები დაფუძნებულია (WHO) ჯანმრთელობის მსოფლიოს ორგანიზაციის რეკომენდაციებზე, რომლებიც თავის მხრივ (ICNIRP) არამაიონიზირებელი რადიაციისგან დაცვის საერთაშორისო კომისიის მიერ 1998 წელს გამოქვეყნებულ რეკომენდაციებზეა დაფუძნებული 300 გჰც სიხშირემდე და IEEE სტანდარტებზე. (WHO, <http://www.who.int/peh-emf/en/> 2023)

ბავშვების მზარდი რაოდენობა იყენებს კომპიუტერებსა და აიპადებს სკოლისთვის, გასართობად და სოციალური აქტივობებისთვის. ბავშვები სიცოცხლის პირველივე დღეებიდან განიცდიან EMF-ების ზემოქმედებას. ბავშვებში კი განსაკუთრებით პატარები/ჩვილები, უფრო დაუცველები არიან ტელეფონის ემ გამოსხივების ზემოქმედების მიმართ მათი ანატომიური და ფიზიოლოგიური მახასიათებლების გამო:

- ✓ ბავშვების თავი პატარა ზომისაა და ნაკლები მანძილია ტვინის მნიშვნელოვან ცენტრებამდე.
- ✓ ბავშვების თავის ქალა და ყურები უფრო თხელია, რის გამოც ელექტრომაგნიტურმა ტალღებმა შემდგომ შეიძლება ადვილად შეაღწიოს ბავშვის თავის ქალის შიგნით.
- ✓ ბავშვების ტვინი შეიცავს მეტ სითხეს და შესაბამისად, შთანთქავს მეტ ემ ველის ენერგიას.

შედეგად, ბავშვებზე მავნე ზემოქმედება/შესაძლო არასასურველი/ნეგატიური შედეგები უფრო სერიოზული შესაძლოა იყოს (Hardell 2018, 137-140).

მნიშვნელოვანია, ემ ფონის შესწავლა, ადამიანზე ელექტრო მოწყობილობების ემ გამოსხივების ზეგავლენის გამოკვლევა, რომელიც იქმნება საბაზო სადგურებისა და ანტენების მიერ. უაღრესად მნიშვნელოვანია, შევისწავლოთ ემ ველის გავლენა ადამიანზე სხვადასხვა სცენარებში (მაგ.: მანქანაში, შენობაში და ა.შ.); გავითვალისწინებული იქნას გარშემო არსებული ობიექტები, რამაც შეიძლება მნიშვნელოვნად შეცვალოს ბუნებრივი ემ ფონი (ჯელაძე 2015), (ნოზაძე 2018).

SAR დასაშვები მნიშვნელობები შემუშავებულია გასაყიდი საკომუნიკაციო მოწყობილობისათვის და ევროპაში – მთელი სხეულისათვის არის 0.08 ვტ/კგ და სხეულის ცალკეული ნაწილებისთვის 2 ვტ/კგ-ზე (თავისთვის), გამომდინარე გამოსხივების დოზიდან, რომელიც შთანთქმება სხეულის 10 გ ქსოვილში. აშშ-ში FCC-ის მიერ SAR-ის ნორმები შედარებით გამკაცრებულია, 0.08 ვტ/კგ და 1.6 ვტ/კგ გამოსხივების დოზიდან გამომდინარე, რომელსაც შთანთქავს სხეულის 1გ ქსოვილი (Faruque 2015). არსებობს ევროპის მიერ დაშვება SAR-ის მნიშვნელობის 4 ვტ/კგმდე გაზრდაზე ზოგიერთი სხეულის ნაწილისთვის, მაგ. ხელებისთვის. გამოიყენება ევროპული ნორმატივი ევროპაში, კორეაში, იაპონიაში და სხვა ქვეყნებში. აშშ-ის ნორმები კი ავსტრალიაში, აშშ-ში, ახალ ზელანდიაში, კანადაში და სხვა ქვეყნებში (Abdul-Al 2022, 511), (Volkow 2011).

როგორც აღინიშნა, SAR არის მარტივი მეთოდი სმარტფონების RF დასხივების მახასიათებლების შესაფასებლად, რათა დადგინდეს, რომ ისინი აკმაყოფილებენ ფედერალური კომუნიკაციების კომისიის (FCC) უსაფრთხოების მოთხოვნებს (Hardell

2018, 137-140). FCC მოითხოვს, რომ მობილური ტელეფონების მწარმოებლებმა თითოეული მოდელის ტელეფონისთვის ჩაატარონ SAR ტესტირება. SAR ტესტირებისას იყენებენ ადამიანის თავისა და სხეულის სტანდარტიზებულ მოდელებს, რომლებიც ივსება სითხით, რომლებიც სიმულაციას უკეთებს RF შთანთქმის მახასიათებლებს ადამიანის სხვადასხვა ქსოვილებში. შესაბამისობის დასადგენად, თითოეული მობილური ტელეფონის ტესტირება ხდება ენერგიის უმაღლეს დონეზე მუშაობისას ყველა სიხშირულ დიაპაზონში, რომლებშიც ის მუშაობს და სხვადასხვა სპეციფიკურ პოზიციებზე თავისა და ტანის მიმართ, მათ შორის თავის თითოეულ მხარეს. მნიშვნელოვანია აღინიშნოს, რომ ყველაზე გაყიდვადი სხვადასხვა მოდელის მობილური ტელეფონის ტესტირებისას, რომელიც ჩატარდა ფედერალური გაიდლაინების მიხედვით, აკრედიტებულ ლაბორატორიაში, მიღებული იქნა, რომ დასხივების დონემ უმეტეს შემთხვევაში გადააჭარბა უსაფრთხოების დონეს და განსხვავდებოდა იმისგან, რაც მობილური ტელეფონების მწარმოებელმა წარუდგინა FCC-ს (ნოზაძე 2018).

FCC-ის ნებართვის მისაღებად გამოყენებული SAR მნიშვნელობა არ ითვალისწინებს ტესტირების პროცესში მობილური ტელეფონის ხელის დაჭერის პოზიციებს, ჩატარებული გაზომვების რაოდენობას, სხვადასხვა მანძილებს ადამიანის თავსა და ტელეფონს შორის. მობილური ტელეფონის მიერ გამოსხივებული და ადამიანის ორგანიზმის მიერ შთანთქმული ემ ენერგიის რაოდენობა დამოკიდებულია ტელეფონის ტექნოლოგიაზე, მანძილზე მომხმარებელს და ტელეფონს შორის, მობილური ტელეფონით კომუნიკაციის ხანგრძლივობაზე, ტიპზე და მომხმარებლის დაშორებაზე მობილური ტელეფონით კომუნიკაციისას ანძებიდან და ა.შ. კვლევის პროცესში თითოეული დეტალის გათვალისწინება ძალიან რთულია, მაგრამ შესაძლებელია ცალკეული მათგანის მნიშვნელოვნების შეფასება (Abdul-Al 2022).

ზემოთქმულის საფუძველზე, ისმება კითხვა აკმაყოფილებს თუ არა მობილური ტელეფონი აღიარებულ უსაფრთხოების სტანდარტებს, რომლებიც საზოგადოების დასაცავად შეიქმნა და საჭიროა თუ არა გადაიხედოს არსებული უსაფრთხოების

სტანდარტები. ამ კითხვებზე დასაბუთებული პასუხების მიღებას ემსახურება წარმოდგენილი დისერტაციით დაგეგმილი კვლევა.

ადამიანზე არ არის ნებადართული რეალური ექსპერიმენტების ჩატარება. ამიტომ კომპიუტერული მოდელირება ემ გამოსხივების ზეგავლენის შესწავლის საშუალებას წარმოადგენს, ადამიანის რეალისტური/არაერთგვაროვანი მოდელების გამოყენებით, რომელთა ფიზიკური ემ და თერმული პარამეტრები ექსპერიმენტული გაზომვებით ცნობილია (Meng 2009, 5060), (შოშიაშვილი 2006), ყველა კერძო შემთხვევებში ძვირი იქნებოდა ემ დასხივების ექსპერიმენტული გაზომვები და ზოგიერთ შემთხვევებში საერთოდ შეუძლებელიც კი. უამრავი არსებული კვლევების მიუხედავად ამ სფეროში, სრულყოფილად ჯერ კიდევ არ არის შესწავლილი ადამიანზე ემ ველის ზეგავლენის საკითხი. მეცნიერები ამ მიმართულებით განაგრძობენ კვლევას რათა მიღებულ იქნას დასაბუთებული პასუხები დასმულ პრობლემატიკაზე.

კვლევის სიახლე, მიზანი და მნიშვნელობა

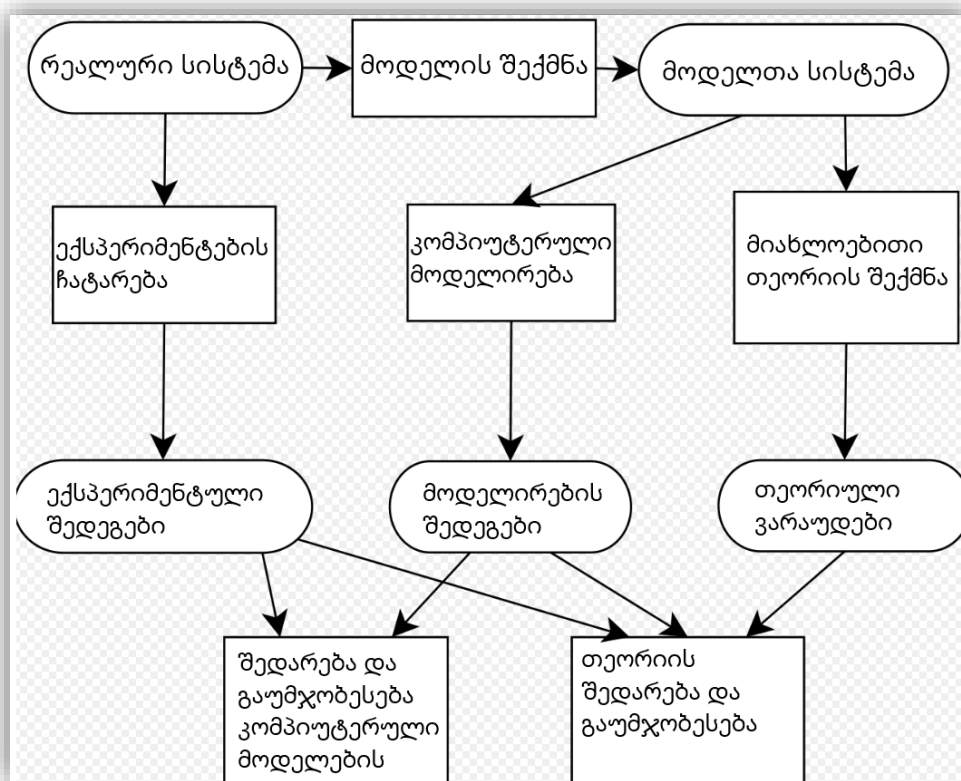
გამოყენებითი ინფორმატიკა წარმოადგენს საინფორმაციო ტექნოლოგიებისა და კომპიუტერული მეცნიერებების იმ ნაწილს, რომელიც ძირითადად გამოიყენება რეალურ სამყაროში სხვადასხვა ამოცანების/პრობლემების გადასაჭრელად. ეს დარგი მოიცავს მონაცემთა ანალიზს, მოდელების შექმნა/დამუშავებას, ალგორითმების შემუშავებას და კომპიუტერული სისტემების ოპტიმიზაციას კონკრეტული ამოცანების შესრულებისთვის და სხვ. მისი ერთ-ერთი მიმართულებაა „**მათემატიკური მოდელირება**“ – რაც გულისხმობს, სხვადასხვა პროცესებისა და სისტემების მოდელების შექმნას დასმული ამოცანის შესაბამისად, საკვლევი სისტემების ქცევის პროგნოზირების და შესწავლის მიზნით.

კომპიუტერული მოდელირება უკანასკნელ პერიოდში ძირითად მეცნიერულ შესაძლებლობად გადაიქცა, რამდენადაც მეცნიერებს საშუალებას აძლევს ჩაატარონ ათასობით იმიტირებული ექსპერიმენტი კომპიუტერული ალგორითმების, კომპიუტერული პროგრამების და რიცხვითი მოდელების გამოყენებით. ფართოდ

გამოიყენება თითქმის ყველა სამეცნიერო მიმართულებით, როგორცაა მედიცინა, ბიოლოგია, ფიზიკა, ასტრონომია და სხვ.

დისერტაციის ფარგლებში შესასწავლად შერჩეული იქნა მეტად აქტუალური სამეცნიერო პრობლემა. კერძოდ, განხორციელდა მობილური ტელეფონის უსაფრთხოების კომპიუტერული მოდელირების გზით ტესტირება და მობილური ტელეფონის მიერ გამოსხივებული ელექტრომაგნიტური ველის ზემოქმედების შესწავლა ადამიანზე; კვლევა განხორციელდა სრულად კომპიუტერული მოდელირების გზით.

უნდა აღინიშნოს, კომპიუტერული მოდელირების შესაძლებლობების უპირატესობა ექსპერიმენტული გაზომვების მიმართ. მოდელირებას შეუძლია განიხილოს ადამიანის არაერთგვაროვანი რეალისტური მოდელები, სხვადასხვა რეალისტური სცენარები/შემთხვევები. აღსანიშნავია, რომ მოდელირების შედეგები კარგ თანხვედრაშია ექსპერიმენტულ გაზომვებთან.



სურათი 2. კომპიუტერული მოდელის აგების პროცესი და კავშირი ექსპერიმენტს, სიმულაციასა და თეორიას შორის

აღსანიშნავია, რომ უსაფრთხოების საერთაშორისოდ აღიარებული სტანდარტები არ განახლებულა ბოლო ათწლეულების განმავლობაში. არსებული სტანდარტები განსაზღვრავენ გამოსხივების დონეს ისეთი შემთხვევებისთვის, რომლებიც ადამიანის ჯანმრთელობისთვის საფრთხეს ქმნის. თუმცა, შესაძლოა გარკვეული ბიოლოგიური ეფექტები არსებობდეს და ისინი არ განიხილებოდეს ადამიანებისთვის საშიშად.

ზოგადად, ანტენები მობილურის მწარმოებლების მიერ იქმნება ისე, რომ რაც შეიძლება მცირე დანაკარგები ჰქონდეს და გადასხივდეს ანტენაზე მიწოდებული ენერგიის მეტი წილი. ამ შემთხვევაში ვამბობთ, რომ კარგად არის შეთანხმებული ანტენა თავისუფალ სივრცესთან; S11 არეკვლის კოეფიციენტი (S11 პარამეტრი) არის მისი რაოდენობრივი მაჩასიათებელი. მნიშვნელობა S11 პარამეტრის დამოკიდებულია მომხმარებლის ხელის/თითების და თავის ურთიერთ პოზიციებზე. ამ მნიშვნელოვან ფაქტორს მწარმოებლები არ აქცევენ ყურადღებას მობილური ტელეფონების წარმოების/უსაფრთხოების ტესტირების პროცესში.

ზემოხსენებულიდან გამომდინარე, წარმოდგენილი **კვლევის მიზანია:**

- ✓ შეიმუშაოს და გამოიკვლიოს რეალისტური რიცხვითი მოდელები მობილური ტელეფონების ტესტირებისთვის ელექტრომაგნიტური უსაფრთხოების თვალსაზრისით.
- ✓ შეიქმნას/შემუშავდეს ხელის ახალი მოდელები, მობილურის დაჭერის რეალისტური პოზიციებით; შესწავლილ იქნას ადამიანის ხელის გავლენა მობილური ტელეფონით კომუნიკაციის ხარისხზე.
- ✓ კვლევის შედეგებზე დაყრდნობით ნაჩვენები იქნას, რომ ცვლილებების შეტანა სასურველია მობილური ტელეფონების უსაფრთხოების ტესტირების სტანდარტში და ამ ცვლილებების განხორციელების შესაძლებლობების კვლევა. მნიშვნელოვანია და სასურველი მწარმოებლების მიერ, ტესტირება განხორციელდეს ადამიანის რეალისტური მოდელების გამოყენებით, ტელეფონის დაჭერის რეალისტური პოზიციების გათვალისწინებით, რიცხვითი გამოთვლების გზით, გაცილებით რეალისტური სურათის წარმოსაჩენად.

კვლევის სიახლე

- დისერტაციის ფარგლებში განხორციელებული კვლევა ინოვაციურია, რამდენადაც დასმული ამოცანის გადასაწყვეტად შეიქმნა და დამუშავდა, გრაფიკული პროგრამების გამოყენებით, ხელის რეალისტური 3D მოდელები მობილური ტელეფონის დაჭერის რეალისტური პოზიციების გათვალისწინებით, რაც სიახლეა;
- შემუშავდა, რიცხვითი ტესტირების პროცედურის ახალი ალგორითმი/მონახაზი. ნაჩვენები იქნა რამდენად განხორციელებადია რეალისტური მოდელების კვლევა, რა სირთულეებს შეიძლება ქონდეს ადგილი, რა ეფექტები, მომენტები იჩენს თავს მოდელირების პროცესში.

მობილური ტელეფონით კომუნიკაციისას, გამოსხივების ფორმირებაში ძირითადად მონაწილეობს ანტენა, ადამიანის თავი და ხელი. უმეტეს შემთხვევებში, ადამიანის თავის სიახლოვეს იქმნება რეაქტიული ემ ველი. ამიტომ,

დეტალურად იქნება გამოკვლეული/შესწავლილი ხელის/თითების სხვადასხვა კონფიგურაცია-პოზიციის, ასევე მომხმარებელსა და ტელეფონს შორის სხვადასხვა დაშორების მანძილების გავლენა, ტელეფონის ანტენის S11 პარამეტრზე (S11 კოეფიციენტზე).

- ასევე, შეისწავლება დამოკიდებულება ტელეფონის ანტენის (S11) შეთანხმების პარამეტრსა და ელექტრომაგნიტური ველის ენერგიას შორის-SAR, რომელსაც შთანთქავს ადამიანის ქსოვილები, თანამედროვე “სმარტფონების“ ფუნქციის გათვალისწინებით, რომ ავტომატურად გაზარდონ გამოსხივების სიმძლავრე კარგი კავშირის აღსადგენად საბაზო სადგურთან სუსტი სიგნალისას.
- მიღებულ შედეგებზე დაყრდნობით, ნაჩვენები იქნება, რომ სასურველია S11 ყოფაქცევა იყოს ერთ-ერთი მაჩვენებელი ტელეფონის უსაფრთხოების სტანდარტებში.

კომპიუტერული მოდელირების გამოყენებით შევისწავლით დისერტაციის ფარგლებში დასახულ ამოცანებს. კვლევის მეთოდს წარმოადგენს დროით არეში სასრული სხვაობების (FDTD) მეთოდი. რიცხვითი ექსპერიმენტები ჩატარდა 1მმ

დისკრეტიზაციის ბავშვის და ქალის 3D - თავის არაერთგვაროვანი მოდელების "Virtual Population", IT'IS Foundation და თსუ-ის გამოყენებითი ელექტროდინამიკისა და რადიო-ინჟინერიის ლაბორატორიაში შექმნილი FDTD Lab პროგრამული პაკეტის გამოყენებით, რომელიც FDTD მეთოდზეა დაფუძნებული (ემ და თერმული სოლვერი). განხორციელდა ემ დასხივება შერჩეული 2100, 3700 (მგჰც) სიხშირეების შესაბამისი სინუსოიდალური სიგნალებით.

მნიშვნელოვანია და სასურველია, რომ მოცემული დისერტაციის ფარგლებში მიღებული ღირებული შედეგები გაითვალისწინონ მობილური ტელეფონების მწარმოებელმა კომპანიებმა მობილური ტელეფონების უსაფრთხოების ტესტირებისას, საერთაშორისო ორგანიზაციებმა, რომლებიც თემატურად კავშირში არიან დასმულ პრობლემატიკასთან. ასევე, მომხმარებლებმა შესაძლო არასასურველი, უარყოფითი შედეგების არიდების მიზნით.

ამოცანის დასმა

FDTD მეთოდის გამოსაყენებლად აუცილებელია საკვლევი არეს დისკრეტიზაცია. ელექტროდინამიკური პროცესი, რომელიც ხდება დისკრეტული უბნების თითოეულ ბადის უჯრედში, განიხილება ერთდროულად დროის ყოველ მომენტში. უნდა აღინიშნოს რომ ამოცანის ამონახსნის სიზუსტის გასაუმჯობესებლად, აუცილებელია დისკრეტიზაციის ზომის შემცირება ან სხვა სიტყვებით, რომ ვთქვათ უნდა გავზარდოთ დისკრეტიზაციის უჯრედების რაოდენობა.

FDTD მეთოდის გამოყენებისას დიფრაქციის ამოცანებში უნდა გათვალისწინებული იქნას არსებული კომპიუტერული რესურსების შესაძლებლობები. ამრიგად, ჩვენ შეზღუდული ვართ საკვლევი არეს ზომებში. ეს ყველაფერი მოითხოვს ძალიან მძლავრს გამოთვლით რესურსს, ან შესაბამისად, საკმაოდ დიდ თვლის დროს. საკვლევი არეს ზომა შეზღუდულია FDTD მეთოდის გამოყენების შემთხვევაში. არსებული კომპიუტერული რესურსებით რთულია

ადამიანის მახლობლად არსებული ობიექტების გათვალისწინება; გამოსხივებული ემ ველის მრავალჯერადი არეკვლა, ინტერფერენციისა და დიფრაქციის მოვლენები არ არის გათვალისწინებული მობილური ტელეფონის მომხმარებლის სიახლოვეს არსებულ ობიექტებზე

ემ ველის ზემოქმედების კვლევისას ადამიანზე (როდესაც საკვლევი არის ზომა მცირეა) გამოიყენება ადამიანის არაერთგვაროვანი, რეალისტური მოდელები. ამ მოდელების ფიზიკური ემ და თერმული პარამეტრების მნიშვნელობები ექსპერიმენტული გაზომვების შედეგად ცნობილია. დროით არეში სასრული სხვაობების (FDTD) მეთოდი არის ასეთი სახის კვლევებში ფართოდ აპრობირებული მეთოდი, და გამოყენებულ იქნა მობილური ტელეფონის ანტენის თავისუფალ სივრცესთან შეთანხმების შესასწავლად. დეტალურად გამოვიკვლიეთ დისერტაციის ფარგლებში, თუ როგორ ცვლის ხელის, თითების სხვადასხვა პოზიცია (ასევე, მობილური ხელთან ერთად) დაშორების სხვადასხვა მანძილები ადამიანის თავის მოდელიდან (1, 10, 20[მმ]) S11 არეკვლის კოეფიციენტს (თავისუფალ სივრცესთან ანტენის შეთანხმება) და ასევე, შესწავლილი იქნა დამოკიდებულება ანტენის შეთანხმების S11-პარამეტრს და SAR - ს შორის. (ჯელაძე 2015) მნიშვნელოვანია, შევაფასოთ მოხმარებლის თავში შთანთქმული სიმძლავრე ხელის (ტელეფონთან ერთად) ზეგავლენის გათვალისწინებით და განვახორციელოთ შედარებითი ანალიზი შემთხვევებისთვის, როდესაც ხელის გავლენას არ ვითვალისწინებთ 2100, 3700 (მგჰც) სიხშირეებზე.

ამისათვის უნდა ამოვხსნათ ემ ველის დიფრაქციის ამოცანა (მაქსველის განტოლებებით) და ხორციელდება საკვლევ არეში ველის განაწილების დადგენა, ხოლო შემდეგ ველის განაწილების საშუალებით შთანთქმული ენერგიის (SAR-ის) პოვნა, რომელიც გარდაიქმნება სითბოში. FDTD მეთოდის გამოყენებისას საჭიროა საკმაოდ მძლავრი კომპიუტერული რესურსი და ექსპერიმენტები ხასიათდება ხანგრძლივი თვლის დროით. FDTD მეთოდი მეტად მოსახერხებელია კვლევების ჩასატარებლად მცირე ზომის არაერთგვაროვან გეომეტრიებზე (Panagopoulos 2007, 69-78), (Gandhi 1996).

დისერტაციაში დასმული ამოცანა (ნოზაძე 2018)- კვლევის გაგრძელებას წარმოადგენს; რომელშიც შეისწავლება ემ დასხივების ამოცანა ადამიანის მოდელებისათვის დიდ და მცირე მასშტაბის მქონე სცენარებში, დამოკიდებულება ემ ველისა და SAR-ის პიკური მნიშვნელობების მობილური ტელეფონის ანტენის თავისუფალ სივრცესთან შეთანხმებაზე 900 მგჰც და 1900 მგჰც სიხშირეებისათვის. ასევე, შესწავლილია ემ გამოსხივების ზეგავლენა მანქანაში მყოფ ადამიანზე (ნოზაძე 2018).

წარმოდგენილი ნაშრომი ითვალისწინებს სითბური ეფექტების შესწავლას, რომლის დროსაც ტემპერატურის მატებას აქვს ადგილი ქსოვილებში.

სადისერტაციო ნაშრომის მოკლე მიმოხილვა

სადისერტაციო ნაშრომი შედგება შესავალის, ოთხი თავისგან შესაბამისი დასკვნებით და რეკომენდაციებით, რომელიც წარმოდგენილია კვლევის ძირითადი შედეგების სახით. ახლავს გამოყენებული ლიტერატურა.

სადისერტაციო ნაშრომის **შესავალში** მოცემულია პრობლემის აქტუალობა და მისი თანამედროვე მდგომარეობა; ნაშრომის მიზანი, სიახლე და მნიშვნელობა და ასევე, ამოცანის დასმა.

პირველ თავში - არსებული ლიტერატურის მიმოხილვა არის წარმოდგენილი. მოცემულია დისერტაციის ფარგლებში დასმულ პრობლემატიკასთან პირდაპირ თუ ირიბად დაკავშირებული მნიშვნელოვანი სამეცნიერო კვლევების შედეგები. კერძოდ, არსებულ პუბლიკაციებზე დაყრდნობით განხილულია ელექტრონული, საკომუნიკაციო მოწყობილობების მიერ გამოსხივებული ემ ველის ზემოქმედებით გამოწვეული სითბური და არასითბური ეფექტები ადამიანზე და ზოგადად, ცოცხალ ბუნებაზე; რაც კიდევ ერთხელ ხაზს უსვამს დასმული პრობლემატიკის აქტუალობას და მნიშვნელოვნებას.

მეორე თავში განხილულია მათემატიკური მეთოდები. აღწერილია დროით არეში სასრული სხვაობების (FDTD) მეთოდი (ნოზაძე 2018) YEE ალგორითმი ემ და სითბური ამოცანებისათვის;

მესამე თავში აღწერილია კომპიუტერული მოდელირებისათვის გამოყენებული იყო კომპიუტერული პროგრამული პაკეტი FDTDLab, აღწერილია პროგრამის მომხმარებლის ინტერფეისის ზოგიერთი მნიშვნელოვანი ფუნქცია, რომელიც საშუალება გვაძლევს ამოვხსნათ ჯერ ელექტროდინამიკული, ხოლო შემდეგ სითბური ამოცანა ემ ველით დასხივებისას ისეთ რთულ და არაერთგვაროვან ობიექტში, როგორც არის ადამიანი.

მეოთხე თავში, შერჩეულ სიხშირეებზე, გამოკვლეულია დეტალურად კომპიუტერული მოდელირების გზით მობილური ტელეფონის დიპოლური ტიპის ანტენით გამოსხივებული ემ ველის ზეგავლენა/ სითბური ეფექტები ზრდასრული ადამიანის (ქალის) და ბავშვის არაერთგვაროვან მოდელებზე (ნოზაძე 2018).

შესწავლილია ადამიანის ხელის და თავის ზემოქმედება ანტენის შეთანხმების პირობებზე მობილური ტელეფონით კომუნიკაციისას, შემუშავდა მობილურის ხელით დაჭერის რეალისტური პოზიციები (მოდელები) მათი შემდგომი სტანდარტიზაციის მიზნით.

ასევე, წარმოდგენილია რიცხვითი ტესტირების პროცედურის მონახაზი, ძირითადი დასკვნები და ზოგადი რეკომენდაციები ემ ველების არასასურველი ზეგავლენის არიდების მიზნით.

თავი I ლიტერატურული მიმოხილვა

შესავალი

ემ გამოსხივების ხელოვნური წყაროების რაოდენობა თანამედროვე ადამიანის ცხოვრებაში მკვეთრად გაიზარდა ელექტროენერგიაზე, სატელეკომუნიკაციო სერვისებზე და ელექტრონულ მოწყობილობებზე არსებული მოთხოვნების ზრდის გამო. მობილური ტელეფონები უკაბელო ტექნოლოგიის ერთ-ერთ შედეგს წარმოადგენს. უკანასკნელ პერიოდში მობილურ ტელეფონებზე დამოკიდებულება საგანგაშო ტემპით იზრდება. ისინი გადასცემენ და იღებენ სიგნალებს ემ ტალღების გამოყენებით, გამოსხივებული ემ ველის ენერგია ნაწილობრივ შთაინთქმება მომხმარებლების ორგანიზმის მიერ. ვინაიდან ელექტრომაგნიტური გამოსხივების ეს წყაროები, მაგალითად მობილური ტელეფონი კომუნიკაციისას თავთან ახლოსაა, ამიტომ საფუძვლიანია შეშფოთება ადამიანის ჯანმრთელობაზე შესაძლო მავნე ზემოქმედების თვალსაზრისით. პრობლემის აქტუალობას მოწმობს ინტენსიური კვლევების არსებობა აღნიშნულ საკითხზე; თუმცა, მეცნიერები ასევე შენიშნავენ, რომ მობილური ტელეფონების ტექნოლოგიის სწრაფი განვითარება ართულებს შესაძლებლობას შემდგომში საბოლოო დასკვნების გაკეთებისა (Naghdi 2016, 2452-2457).

1.1. ემ ველის ზემოქმედებით გამოწვეული სითბური და არასითბური ეფექტები ადამიანზე

არსებობს ელექტრომაგნიტური ველებისგან თავდაცვის ისეთი ეფექტური საშუალება, როგორიცაა ეკრანირება, მაგრამ ხშირად მისი გამოყენება არაეფექტურია, ვინაიდან შეუძლებელია მრავალი მოწყობილობის მთლიანად ეკრანირება მუშაობის პროცესში ვენტილაციის აუცილებლობის გამო. ასეთ შემთხვევაში კი გარკვეულ სიხშირეებზე ეს სტრუქტურები წარმოადგენენ რეზონანსულ სტრუქტურებს, რაც ხელს უწყობს მის შიგნით, ემ ველის გაძლიერებას. ავტომობილში ემ ველის არასასურველი ზემოქმედების თავიდან აცილების ერთ-ერთი საშუალებაა მისი განაწილების შესწავლა ავტომობილის შიგნით, რათა გამოვლინდეს ის ზონები, სადაც ველის სიდიდე დასაშვების ფარგლებშია, ანუ მავნე ზეგავლენის საშიშროება მინიმალურია.

ავტომობილში სხვადასხვა სიხშირის ემ ველების განაწილების შესასწავლად თანამედროვე მეცნიერულ სამყაროში მიმდინარეობს აქტიური კვლევა, როგორც რეალური ექსპერიმენტის ჩატარების გზით, ასევე რიცხვითი ექსპერიმენტების საშუალებით. რეალური ექსპერიმენტის ჩატარება დაკავშირებულია მრავალ ფინანსურ და ტექნოლოგიურ საკითხებთან. თვით წამყვანი სამეცნიერო დაწესებულებები და საავტომობილო ფირმები აწყდებიან რიგ პრობლემებს, დაკავშირებულს ასეთ ექსპერიმენტებთან (კაკულია 2003).

ალტერნატიული გზა, როგორც ზემოთ აღვნიშნეთ, წარმოადგენს პრობლემის შესწავლა რიცხვითი გამოთვლების/სიმულაციების მეშვეობით. ამ შემთხვევაშიც ვლინდება გარკვეული სირთულეები, რომლებიც კომპიუტერულ რესურსებთან არის დაკავშირებული. კერძოდ, რეალისტური ავტომობილის კომპიუტერულ მოდელში მრავალი დეტალის გათვალისწინება ხდება საჭირო, რაც მნიშვნელოვნად ზრდის გამომთვლელი მანქანის ოპერატიულ მეხსიერებაზე მოთხოვნას და შესაბამისად, ამ ინფორმაციის დასამუშავებლად არსებული რიცხვითი ალგორითმების დახმარებით საჭირო ხდება თანამედროვე სუპერ-კომპიუტერების გამოყენება (შოშიაშვილი 2006) , (კაკულია 2003).

ხელოვნური ელექტრომაგნიტური ველების (EMR) ზემოქმედებით გამოწვეული ჯანმრთელობის პოტენციური საფრთხე მე-18 საუკუნის ბოლოდან გახდა კვლევის აქტუალური თემა, განსაკუთრებით კი ბოლო 30 წლის განმავლობაში. ამ ველის ზემოქმედება რეპროდუქციულ ჯანმრთელობაზე, კიბოს განვითარებაზე, ცენტრალურ ნერვულ სისტემაზე, გულ-სისხლძარღვთა სისტემაზე, იმუნურ ფუნქციაზე, ადამიანის ქცევაზე, ძილის რეჟიმზე და ენერგიის მეტაბოლიზმზე შესწავლილია მრავალ კვლევაში (Chao 2019, 535-540), მაგრამ EMR-ის გავლენა საზოგადოებაზე და ეკოლოგიურ გარემოზე ჯერ კიდევ ბუნდოვანია.

ეპიდემიოლოგიურ კვლევებში შესწავლილია უვითარდებათ თუ არა ELF-EMF ან RF-EMF ზემოქმედების შედეგად ბავშვებს ლეიკემია. ნაჩვენებია, რომ მოზრდილებში შეიძლება განვითარდეს ტვინის სიმსივნეები და ასევე, ლეიკემია (Lagiou 2002, 33-39) , (Swerdlow 2011, 1534-1538). მიუხედავად ამისა, ვერ იქნა დადგენილი პირდაპირი კავშირი ბავშვთა ლეიკემიის სიხშირის გაზრდას და ELF-EMF ზემოქმედებას შორის (Kleinerman 1997, 575-583), (Leitgeb 2011, 251-262), (Jirik 2012, 597-601). შესწავლილი იქნა, რომ არ არსებობს პირდაპირი კორელაცია ბავშვებში მწვავე ლიმფობლასტურ ლეიკემიასა და ELF-EMF-ის ზემოქმედებას შორის (Kleinerman 1997, 575-583). ჯანმრთელობის რისკების შეფასებისას, ჯანმო-ს (ჯანმრთელობის მსოფლიო ორგანიზაცია) სამეცნიერო ექსპერტთა სამუშაო ჯგუფმა დაასკვნა, რომ არ წარმოიქმნება ჯანმრთელობის არსებითი პრობლემები ELF-EMF-ების ზემოქმედებით იმ დონეზე, რომელის უსაფრთხოების ნორმების ფარგლებშია. თუმცა ვარაუდობენ, რომ სხვადასხვა ნევროლოგიური ცვლილებები შეიძლება წარმოიშვას EMF-ის ზემოქმედების შედეგად, კომუნიკაციისას მობილური ტელეფონის მდებარეობისა და კრანიალური ნერვული სისტემის ერთმანეთთან უშუალო სიახლოვის გამო. ამიტომ, დიდი ინტერესი ფოკუსირებულია კრანიალური ნერვული სისტემის შესაძლო კანცეროგენეზზე RF-EMF-ის ზემოქმედებით (C. M. Hardell 2005, 390-394)

კვლევამ აჩვენა, რომ მობილური ტელეფონების გამოყენებამ 10 წელზე მეტი ხნის განმავლობაში, დღეში ერთი საათის კომუნიკაციისას შეიძლება გაზარდოს სიმსივნის განვითარების რისკი (C. M. Hardell 2005).

კვლევის შედეგებზე დაყრდნობით, WHO-ის მიერ RF-EMF-ები კლასიფიცირებულია, როგორც „ადამიანისთვის შესაძლოა კანცეროგენი“ (Baan 2011, 624-626). თუმცა, RF-EMF-ების კლასიფიკაცია, როგორც შესაძლო კანცეროგენები, მეცნიერებისათვის ჯერ კიდევ არ წარმოადგენს მკაფიო დასკვნას (Abdul-Al 2022, 511).

დადგენილია ჩატარებული კვლევებით, რომ ემ ველსა და ბიოლოგიურ ობიექტს შორის ურთიერთქმედება გამომსხივებლის მახასიათებლებზეა დამოკიდებული (Maria 2014, 9376-9408) სიხშირეზე, ობიექტის მიმართ წყაროს ორიენტაციაზე და მდებარეობაზე (Faruque 2015), (Santomaa 2000, 1988–1995). ემ ველის გამოსხივებული ტალღის ფორმასა და ამპლიტუდურ მნიშვნელობაზე (Meng 2009, 5060); ასევე, ბიოლოგიური ორგანიზმის მიერ ენერგიის შთანთქმისა და შენახვის უნარზე; ბიოლოგიური სისტემის გეომეტრიულ ზომებთან თანაფარდობა დაცემული ტალღის სიგრძის ასევე, ძალზედ მნიშვნელოვანია. მობილური ტელეფონის მიერ გამოსხივებული ემ ველი მოქმედებს ადამიანის ნერვულ სისტემაზე, რამაც შესაძლოა უარყოფითი ზეგავლენა მოახდინოს ადამიანის ორგანიზმის, გამართულ ფუნქციონირებაზე, როგორც ერთიანი მთლიანის (Hossmann 2003, 49-62). მეცნიერები აღნიშნავენ, რომ სწრაფი ცვლილება მობილური ტელეფონების ტექნოლოგიისა შემდგომი დაკვირვებების წარმართვას ართულებს (Hardell 2018, 137-140), (Carlberg M 2013, 85-110). ჩატარებული კვლევებით დადგენილ იქნა, რომ RF ემ ველი ადამიანში ონკოლოგიური დაავადებების განვითარების მიზეზი შესაძლოა იყოს (Anjana 2016, 5-9); ასევე, მიზეზი სისხლის შემადგენლობის დარღვევის და ჰორმონული ცვლილებების (Asadollah 2009, 274–278), (Niño 2004, 73-83). ემ ველები იწვევენ ენცეფალური ბარიერის დარღვევას და ტვინში ნეირონების დაზიანებას (Lin 2011), (Busljeta 2006, 247-251). საყურადღებოა განსაკუთრებით, არასასურველი ზეგავლენა ბავშვებზე; ბავშვები ადრეული ასაკიდანვე განიცდიან RF გამოსხივების გავლენას. ტვინი ემ გამოსხივებისათვის არის „ძირითადი სამიზნე ორგანო“. მათი ნერვული სისტემა, თავის ტვინი ჯერ კიდევ ჩამოყალიბების პროცესშია, (Hossmann 2003, 49-62) განსხვავდება მცირედით ქსოვილის შემადგენლობა (შედარებით მეტი რაოდენობით წყალს შეიცავს) (SHUMEI 1999, 244–252), ბავშვების თავის ქალა უფრო თხელია, ემ გამოსხივების მიმართ მეტად შეღწევადია მოზრდილებთან შედარებით და შედეგად,

ბავშვებში შესაძლო უარყოფითი შედეგები უფრო სერიოზული შესაძლოა იყოს (Morgan 2012, 34–51), (Paulides 2011, 4967– 4989). დადგინდა კვლევებით, რომ ადამიანებს რომლებიც დღის განმავლობაში 50 წუთზე მეტ ხანს ატარებენ მობილურ ტელეფონთან, შესაძლებელია ადრეული დემენცია განუვითარდეთ, ამ დროს ვლინდება უმაღლესი ფსიქიკური ფუნქციების: აზროვნების, მეხსიერების, ორიენტაციის, მეტყველების, დასწავლის, მსჯელობის მრავალფეროვანი აშლილობები (Naghdi 2016, 2452–2457), (Hossmann 2003, 49–62).

(Maria 2014, 9376–9408) -შრომაში განხილულია ბოლო პერიოდში სამეცნიერო ჯგუფების მიერ მიღებული სამეცნიერო შედეგები. საიდანაც ნათელია, თუ რა პოტენციური საფრთხეს შეიცავს ემ ველის ხანგძლივად ზემოქმედება ადამიანის ჯანმრთელობაზე.

მობილური ტელეფონებისა და საბაზო სადგურის გამოსხივების სითბური თუ არასითბური ზემოქმედება ადამიანზე აღწერილია სხვადასხვა კვლევებში. დაფიქსირდა ყურში სითბოს, თავის ტკივილი და სახის კანზე წვის შეგრძნება (L. C. Hardell 2007) .

მობილური ტელეფონის გამოყენება ძილის წინ აფერხებს და ამცირებს ძილის ხანგძლივობას; იწვევს დეპრესიას, დაბნეულობას. ახდენს გავლენას ტვინის ფიზიოლოგიაზე. უკანასკნელი პერიოდის კვლევებით დადგენილია, რომ გამოსხივებული ემ ველის ზემოქმედება განსაკუთრებით ბავშვებს და მოზარდებს აზარალებს, რადგან ისინი ღამით მობილურებს იყენებენ და ტელეფონები თავის მახლობლად უდევთ. ეს იწვევს ხასიათის და განწყობის ცვალებადობას, დეპრესიას, ცუდ კონცენტრაციას და აკადემიური მოსწრების გაუარესებას (Nadimikeri 2023) .

როგორც აღინიშნა, ბავშვებში მობილური ტელეფონის გამოსხივების მიმართ მგრძნობიარენი არიან უფრო, მათი პატარა ზომის თავისა და ტვინში ემ ველის ადვილად შეღწევადობის გამო. თავის ქალას უფრო თხელი ძვლების, უფრო ელასტიური ყურების, თხელი კანის, სისხლის უჯრედების მცირე მოცულობის და ნერვული უჯრედების დიდი გამტარობის გამო, ისინი შთანთქავენ უფრო მეტ ენერგიას, ვიდრე მოზრდილები და ენერგია უფრო ღრმად აღწევს თავის შიგნით (G. K. Kumar 2010).

შესწავლილია (www.mobileindian.com) მობილური ტელეფონის მიერ გამოსხივებული ემ ველის ენერგიის შთანთქმა (სიხშირე - GSM 900 მგჰც) ზრდასრულის, 10 წლის და 5 წლის ბავშვების თავში. ადამიანის ემ დასხივებისას ველი აღწევს 5 წლის ბავშვის თავის ტვინის მოცულობის 75%-ში, ზრდასრული ადამიანის თავის ტვინის მოცულობის 25%, 10 წლის ბავშვის ტვინის მოცულობის 50%-ში.

ორსული ქალი და ნაყოფი ემ ზემოქმედებისას რისკის ქვეშ არიან, რამდენადაც განვითარებად ემბრიონზე RF გამოსხივება მუდმივად მოქმედებს. შეიძლება მიკროტალღურმა გამოსხივებამ დააზიანოს პლაცენტური ბარიერი, მემბრანა, რომელიც ზოგიერთი არასასურველი ნივთიერების გავლას ნაყოფის და დედის სისხლს შორის ხელს უშლის და იცავს ნაყოფს. ამიტომ სასურველი არის, რომ ორსულები მობილურ ტელეფონების ხანგრძლივ გამოყენებას მოერიდონ და ისინი გამოიყენონ მნიშვნელოვან შემთხვევებში მხოლოდ (Abdul-Al 2022, 511).

პირდაპირმა და ხანგრძლივმა ემ გამოსხივების ზემოქმედებამ შესაძლოა ადამიანის გულზე უარყოფითი გავლენა მოახდინოს. კერძოდ, (ICD) იმპლანტირებული გულსისხლძარღვთა დეფიბრილატორები, კარდიოსტიმულატორები და პულსის გენერატორები გულის არითმიის მიზეზი შეიძლება გახდნენ. გადამცემი ანძების და მობილური ტელეფონების ემ გამოსხივებამ შეიძლება შეუშალოს ხელი იმპლანტირებული კარდიოსტიმულატორების მუშაობას, რეგულარულად შეაფერხოს იმპულსების მიწოდება და შექმნა, რამაც პაციენტის სიკვდილი შეიძლება გამოიწვიოს (r. L. Sharma 2017, 423-435).

1.2. ემ ველის გავლენა ბუნებაზე

რამოდენიმე წლის წინ ჩატარებული კვლევით ნაჩვენები იქნა, რომ დაფიქსირდა ფუტკრების უეცარი სიკვდილი, რაც დაკავშირებული იყო ელექტროსმოგის ზემოქმედების ზრდასთან. ფუტკრები ვერ ახერხებდნენ სკაში დაბრუნებას მუდმივი ფონური ელექტრომაგნიტური ხმაურის გამო, რაც როგორც ჩანს, არღვევს ფუტკრების ერთმანეთთან კომუნიკაციას. რაც ცნობილია სახელწოდებით: კოლონიის კოლაფსის დარღვევა (*CCD*) (Taye 2017, 1527-1529).

ფუტკრების ამჟამინდელმა სიკვდილმა/გაქრობამ შეიძლება სერიოზული ზიანი მიაყენოს ადამიანის ჯანმრთელობას/ცხოვრების ხარისხს. მეცნიერები თვლიან, რომ ფუტკრების და სხვა დამამტვერებლების თანდათანობით შემცირებამ შეიძლება გამოიწვიოს სერიოზული პრობლემები უფრო მასშტაბური და მყისიერი, ვიდრე გლობალური დათბობა (Johnson 2009, 14790-14795). საბედნიეროდ, განგაშის ზარი დარეკეს და დროა შემუშავდეს სტრატეგიული გეგმები, რათა დავიცვათ არა მხოლოდ თაფლის ფუტკრები, არამედ ადამიანის სიცოცხლე და გარემო EM - გამოსხივების უარყოფითი გავლენისგან.

მობილური ტელეფონებიდან და საბაზო სადგურების ემ გამოსხივება გავლენას ახდენს ფრინველებზე, ცხოველებზე, მცენარეებსა და გარემოზე (Surendran 2020, 193-202). იშვიათად თუ დაინახავთ მტრედს, ბელურას, ან რომელიმე სხვა ფრინველს, რომელიც სატელეფონო ანძის მახლობლად რჩება და დაფრინავს. ეს იმიტომ ხდება, რომ ფრინველის ზედაპირის ფართობი შედარებით დიდია ვიდრე მისი წონა. ამიტომ, მისი სხეული შთანთქმავს მეტ ემ გამოსხივების ენერგიას. ვინაიდან, სითხის შემცველობა მცირეა მისი მსუბუქი წონის გამო, მისი სხეული ძალიან სწრაფად თბება და მაგნიტური ველი ასევე, ხელს უშლის და აუარესებს ფრინველების ნავიგაციის შესაძლებლობებს (G. P. Kumar 2021, 624-626). როდესაც ფრინველები განიცდიან გარკვეული მნიშვნელობის *EMF*-ების ზემოქმედებას, ისინი დეზორიენტირებული ხდებიან, იწყებენ ფრენას ყველა მიმართულებით და ნავიგაციური შესაძლებლობები გაუარესებულია. ბევრი ფრინველი, როგორიცაა ბელურები, მტრედები, გედები და ა.შ., ცდილობენ გათავისუფლდნენ/ მოსცილდნენ ახალ "უხილავი მტერს", კერძოდ, მობილური ტელეფონის ანძებისგან. ინდოეთში ბელურის პოპულაცია მკვეთრად

შემცირდა, 75%-ით 1994 წლიდან დღემდე. კვლევებმა აჩვენა, რომ ფრინველების გაუჩინარება GSM სატელეფონო ანძებთან, მჭიდრო კავშირშია დროში (Panagopoulos 2007, 69-78).

ფრინველების პოპულაციის შემცირება არის საგანგაშო სიგნალი იმისა, რომ ჯანსაღი ეკოსისტემა განიცდის საგანგაშო ცვლილებებს, რაც გამოვლინდება უახლოეს მომავალში, იგი ადამიანის სიცოცხლის ხარისხზე/ ჯანმრთელობაზეც აუცილებლად ჰპოვებს ასახვას (Silva 2007).

როგორც აღინიშნა, სატელეფონო ანძებთან ახლოს ფრინველებში შეინიშნებოდა ქცევითი ცვლილებები. ახალგაზრდა ფრინველები გაურკვეველი მიზეზების გამო ილუპებოდნენ და ფრინველების წყვილი ხშირად ჩხუბობდა ბუდეების აშენების პროცესში. ზოგიერთი ბუდე დაუმთავრებელიც კი იყო (Summers-Smith 2003, 439-446). სატელეფონო ანძების მიერ გამოსხივებული მიკროტალღები ასევე მოქმედებს ფრინველების რეპროდუქციულ სისტემაზე (Bernardi 2003). ერთ-ერთ ექსპერიმენტში ქათმის ემბრიონების 75% მოკვდა, რომლებიც დასხივებული იქნა ემ ველით გამრავლების სეზონზე, იმ 16% -თან შედარებით, რომლებიც არ განიცდიდნენ რადიაციას (Everaert 2007, 63-72) აღმოჩნდა, რომ სატელეფონო კოშკებში მობინადრე ფრინველებმა ბუდე ერთი კვირის განმავლობაში მიატოვეს. გადამცემი კოშკების მახლობლად ბუდეებში დადებული კვერცხები არ იჩეკებოდა (S. K. Sharma 2009, 5543-5547).

გარდა ცხოველებისა, თაფლის ფუტკრებისა და ფრინველებისა, EMR შეიძლება ასევე, უარყოფითად იმოქმედოს მათ სიახლოვეს არსებულ მცენარეთა კულტურებზე. კვლევები აჩვენებს, რომ EMF-ს შეუძლია დათრგუნოს თესლი და შეანელოს აღმოცენების უნარი და ფესვების ზრდა. ხორბლისა და სიმინდის მოსავლიანობის შემცირება ასევე, დაფიქსირდა მაღალ EMF-ის მახლობელ მინდვრებში (Soja 2003, 91-102).

დასკვნა

კვლევა ასახავს და აჯამებს სხვადასხვა კვლევითი ინსტიტუტებისა და ორგანიზაციების მიერ ჩატარებულ კვლევების შედეგებს. ნაშრომი მოტივირებული იყო იმით, რომ საზოგადოება შეშფოთებულია მობილური ტელეფონების ხანგრძლივი გამოყენებისას შესაძლო საფრთხის გამო. მობილური ტელეფონების მომხმარებელთა რაოდენობა დღითიდღე საოცარი სისწრაფით იზრდება, მაგრამ ადამიანების უმეტესობამ არ იცის მობილური ტელეფონების გავლენა ადამიანის ჯანმრთელობაზე. თუმცა, მობილური ოპერატორები აგებენ სატელეფონო ანძებს ქვეყნის ყველა შესაძლო კუთხეში, რათა გააფართოვონ საკუთარი ქსელი, მიუხედავად იმისა, რომ ოპერატორები აცხადებენ, რომ ჯანმრთელობის პრობლემები/საფრთხე არ არსებობს. ზოგიერთი კვლევა (Asl 2019, 18017-18031), აჩვენებს, რომ არსებობს ძლიერი კორელაცია მობილური ტელეფონის გამოსხივებას და ადამიანებში ჯანმრთელობის ძირითად ჯანმრთელობის პრობლემებს შორის. თუმცა ასევე აღნიშნულია, რომ არ არსებობს მნიშვნელოვანი გავლენა მობილური ტელეფონებისა და საბაზო სადგურების არამაიონიზებელი გამოსხივებისა ადამიანზე (Meena 2016, 5). მეორეს მხრივ, ზოგიერთ სტატიაში მეცნიერები ვარაუდობენ, რომ მობილური ტელეფონების ხანგრძლივი გამოყენება, მობილური და საბაზო სადგურების ემ ველის ზემოქმედება იწვევს არანორმალურ ფსიქიკურ აშლილობას, ძილის დარღვევას, კონცენტრაციის გაძნელებას, თავის ტკივილს, გაღიზიანებას, თავბრუსხვევას და ჰიპერტენზიას (Lönn 2004, 653-659). სამეცნიერო დაკვირვებებით შემჩნეულია შინაური ბელურების პოპულაციის მკვეთრი შემცირება (*Passer domesticus*). ამიტომ, დროა ჩატარდეს მულტიდისციპლინური კვლევები, რათა გაიშიფროს მობილური ტელეფონებიდან და მობილური ანძებიდან რადიაციის გავლენა ადამიანებზე და გარემოზე. ასევე აუცილებელია, რომ დაცული იყოს უსაფრთხოების ნორმები (Hirata 2005).

თავი II კვლევის მეთოდოლოგია

2. 1. FDTD მეთოდი

არასტაციონალური პროცესების შესასწავლად დროში, დიფრაქციის ამოცანის ამოსახსნელად არაერთგვაროვან რთული ფორმის სხეულზე, როგორც ადამიანის სხეულია, დროით არეში სასრული სხვაობების (FDTD) მეთოდი გამოიყენება (ჯელაძე 2015). FDTD საკვლევი არის დისკრეტიზებას მოითხოვს და ერთდროულად განიხილება საკვლევი ბადის ყველა უჯრედში მიმდინარე პროცესი დროის თითოეულ მომენტში. მოცემულ სივრცე-დროის ბადეზე ინტეგრალური განტოლებების დისკრეტიზირება შესაძლებელს ხდის მოცემული წყაროების და ფიზიკური პარამეტრების შემთხვევაში, ამოიხსნას მაქსიმალური განტოლებები. ამოცანის ამოხსნის სიზუსტის გაზრდისათვის ბადის დისკრეტიზაციის ზომა უნდა შემცირდეს. ამიტომ შეზღუდულები ვართ FDTD მეთოდის გამოყენებისას განსახილველი არის დიდი ზომებისას, რამდენადაც გამოთვლის საკმაოდ დიდ თვლის დროს და მძლავრ კომპიუტერულ რესურსს საჭიროებს (ჯელაძე 2015), (ნოზაძე 2018).

ფარადეის კანონი

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = -\nabla \times \vec{E} - \vec{M} \quad (2.1a)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \iint_A \vec{B} \cdot d\vec{A} = -\oint_l \vec{E} \cdot d\vec{l} - \iint_A \vec{M} \cdot d\vec{A} \quad (2.1b)$$

ამპერის კანონი

$$\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = \nabla \times \vec{H} - \vec{J} \quad (2.2a)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \iint_A \vec{D} \cdot d\vec{A} = \oint_l \vec{H} \cdot d\vec{l} - \iint_A \vec{J} \cdot d\vec{A} \quad (2.2b)$$

გაუსის კანონი ელექტრული ველისთვის

$$\nabla \cdot \vec{D} = 0 \quad (2.3a)$$

$$\iint_A \vec{D} \cdot d\vec{A} = 0 \quad (2.3b)$$

გაუსის კანონი მაგნიტური ველისთვის

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (2.4a)$$

$$\iint_A \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0 \quad (2.4b)$$

E - ელექტრული ველი (V/m²)

D - ელექტრული ნაკადის სიმკვრივე (C/m)

H - მაგნიტური ველი (A/m)

B - მაგნიტური ნაკადის სიმკვრივე (W/ m²)

A - ნებისმიერი 3-განზომილებიანი ზედაპირი

dA - დიფერენციალური ნორმალური ვექტორი, ახასიათებს A ზედაპირს (m²)

L - ჩაკეტილი კონტური რომელიც შემოსაზღვრავს A ზედაპირს

dL - დიფერენციალური სიგრძის ვექტორი, ახასიათებს L კონტურს (m)

M - ექვივალენტური მაგნიტური დენის სიმკვრივე V/ m²)

$$\begin{aligned} \vec{D} &= \epsilon \vec{E} = \epsilon_0 \epsilon_r \vec{E} \\ \vec{B} &= \mu \vec{H} = \mu_0 \mu_r \vec{H} \end{aligned} \quad (2.5)$$

ϵ - ელექტრული შეღწევადობა (f/m)

ϵ_r - ფარდობითი შეღწევადობა (უგანზომილებო სკალარი)

ϵ_0 - თავისუფალი სივრცის შეღწევადობა (8.854 x 10⁻¹² f/m)

μ - მაგნიტური გამტარებლობა (h/m)

μ_r - ფარდობითი გამტარებლობა (უგანზომილებო სკალარი)

μ_0 - თავისუფალი სივრცის გამტარებლობა (4π x 10⁻⁷ h/m)

$$\begin{aligned} \vec{J} &= \vec{J}_{source} + \sigma \vec{E} \\ \vec{M} &= \vec{M}_{source} + \sigma^* \vec{H} \end{aligned} \quad (2.6)$$

σ - ელექტრული გამტარობა (s/m)

σ^* - ექვივალენტური მაგნიტური დანაკარგი (Ω/m)

(2.5), (2.6) -> (2.1a), (2.2a). ეს იძლევა მაქსველის როტორულ განტოლებებს წრფივ, იზოტროპულ, არადისპერსიულ, დანაკარგებიან გარემოში:

$$\frac{\partial \vec{H}}{\partial t} = -\frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{E} - \frac{1}{\mu} (\vec{M}_{source} + \sigma^* \vec{H}) \quad (2.7)$$

$$\frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \nabla \times \vec{H} - \frac{1}{\varepsilon} (\vec{J}_{source} + \sigma \vec{E}) \quad (2.8)$$

გავითვალისწინოთ:

$$\vec{E} = E_x \vec{i} + E_y \vec{j} + E_z \vec{k} = \langle E_x, E_y, E_z \rangle; \quad \vec{H} = H_x \vec{i} + H_y \vec{j} + H_z \vec{k} = \langle H_x, H_y, H_z \rangle;$$

$$rot \vec{F} = \nabla \times \vec{F} = \vec{i} \left(\frac{\partial F_z}{\partial y} - \frac{\partial F_y}{\partial z} \right) + \vec{j} \left(\frac{\partial F_x}{\partial z} - \frac{\partial F_z}{\partial x} \right) + \vec{k} \left(\frac{\partial F_y}{\partial x} - \frac{\partial F_x}{\partial y} \right)$$

მივიღებთ 6-წყვილ სკალარულ განტოლებათა სისტემას:

$$\frac{\partial H_x}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left[\frac{\partial E_y}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial y} - (M_{source_x} + \sigma^* H_x) \right] \quad (2.9a)$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left[\frac{\partial E_z}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial z} - (M_{source_y} + \sigma^* H_y) \right] \quad (2.9b)$$

$$\frac{\partial H_z}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left[\frac{\partial E_x}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial x} - (M_{source_z} + \sigma^* H_z) \right] \quad (2.9c)$$

$$\frac{\partial E_x}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left[\frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} - (J_{source_x} + \sigma E_x) \right] \quad (2.10a)$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left[\frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} - (J_{source_y} + \sigma E_y) \right] \quad (2.10b)$$

$$\frac{\partial E_z}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left[\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} - (J_{source_z} + \sigma E_z) \right] \quad (2.10c)$$

(2.9) და (2.10) კერძო წარმოებულებიანი დიფერენციალურ განტოლებათა სისტემა წარმოადგენს FDTD რიცხვითი ალგორითმის საფუძველს, EM ტალღების 3D ობიექტებთან ურთიერთქმედების დასამოდელოებლად.

დავუშვათ, დასამოდელოებელი სტრუქტურა უსასრულოდ გრძელდება z -მიმართულებით, მისი ფორმის ან პოზიციის ცვლილების გარეშე განივ კვეთაში. თუ დაცემული ტალღა ასევე ერთგვაროვანია z -მიმართულებით, მაშინ ველების ყველა კერძო წარმოებული z -ის მიმართ უნდა იყოს 0-ის ტოლი. ამ პირობებში, მაქსველის როტორულ განტოლებათა სრული კრებული (2.9) და (2.10) დაიყვანება განტოლებებამდე:

$$\frac{\partial H_x}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left[-\frac{\partial E_z}{\partial y} - (M_{soursex} + \sigma^* H_x) \right] \quad (2.11a)$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left[\frac{\partial E_z}{\partial x} - (M_{soursey} + \sigma^* H_y) \right] \quad (2.11b)$$

$$\frac{\partial H_z}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left[\frac{\partial E_x}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial x} - (M_{soursez} + \sigma^* H_z) \right] \quad (2.11c)$$

$$\frac{\partial E_x}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left[\frac{\partial H_z}{\partial y} - (J_{soursex} + \sigma E_x) \right] \quad (2.12a)$$

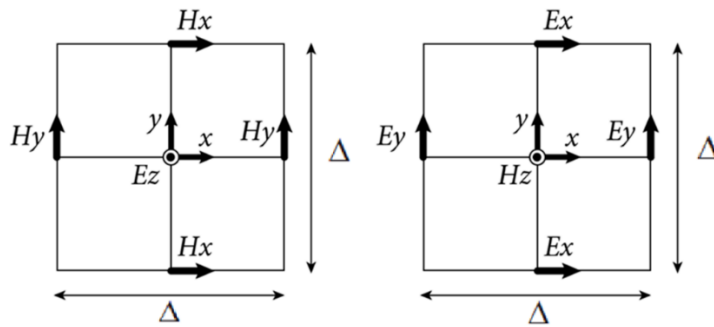
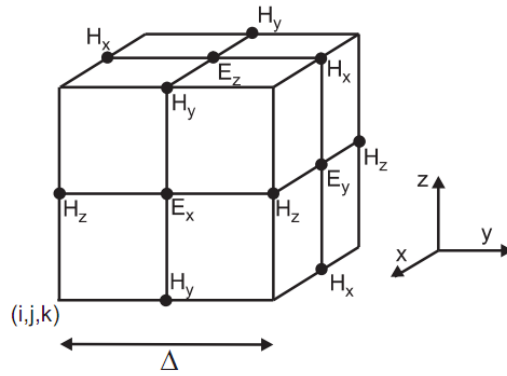
$$\frac{\partial E_y}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left[-\frac{\partial H_z}{\partial x} - (J_{soursey} + \sigma E_y) \right] \quad (3.12b)$$

$$\frac{\partial E_z}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left[\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} - (J_{soursez} + \sigma E_z) \right] \quad (2.12c)$$

2.1.1. YEE ალგორითმი

1966 წელს, YEE-მ შექმნა სასრული-სხვაობების განტოლებათა კომპლექტი დროზე დამოკიდებული მაქსველის როტორული განტოლებათა სისტემისთვის (3.9) და (3.10) უდანაკარგო მასალების შემთხვევაში $\sigma^* = 0$ და $\sigma = 0$. YEE ალგორითმს კვლავაც დიდი გამოყენება აქვს, რადგან ძლიერი ფუნდამენტური საფუძველია. კერძოდ:

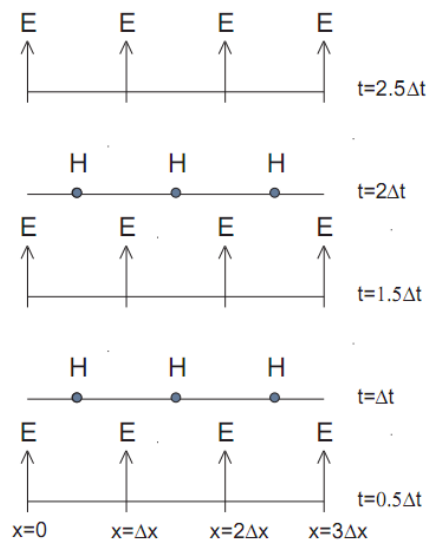
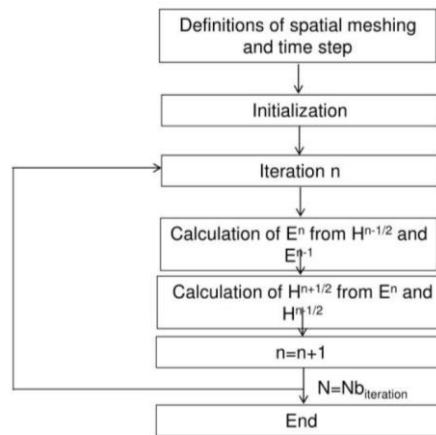
1. Yee ალგორითმი ამოხსნის ორივე ელექტრულ და მაგნიტურ ველებს დროსა და სივრცეში, მაქსველის როტორული განტოლების გამოყენებით. ხოლო ტალღური განტოლების ამოხსნით მარტო ელექტრული ველისთვის (ან მარტო მაგნიტური ველისთვის).
2. Yee ალგორითმი E და H კომპონენტებს ათავსებს 3-განზომილებიან სივრცეში ისე, რომ ყველა E კომპონენტი გარშემორტყმულია ოთხი მოცირკულირე H კომპონენტით და თითოეული H კომპონენტი გარშემორტყმულია ოთხი მოცირკულირე E კომპონენტით. **სურ. 2.1.** ეს გვადლევს სამგანზომილებიანი სივრცის მარტივ სურათს, რომელიც ივსება ფარადეის კანონისა და ამპერის კანონის კონტურების ერთმანეთთან დაკავშირებული მასივით. მაგალითად, შესაძლებელია Yee E -კომპონენტების იდენტიფიცირება, რომლებიც დაკავშირებულია გადაადგილების მიმდინარე ნაკადთან, რომელიც ბმულია H მარყუჟებთან, ასევე H -კომპონენტები დაკავშირებულია მაგნიტურ ნაკადთან, რომელიც ბმულია E მარყუჟებთან. ფაქტობრივად, Yee ალგორითმი ერთდროულად ახდენს წერტილოვანი დიფერენციალური ფორმის სიმულაციას და მაქსველის განტოლების მაკროსკოპული ინტეგრალური ფორმის სიმულაციას. ეს უკანასკნელი ძალიან გამოსადეგია ველის სასაზღვრო პირობებისა და სინგულარობის დასადგენად.



სურათი 2.1. ელექტრული და მაგნიტური ველის ვექტორული კომპონენტების პოზიცია Yee სივრცითი ბადის ერთეულ კუბურ უჯრედზე.

როგორც ნაჩვენებია **სურ. 2.2-ზე**, Yee ალგორითმი ასევე აცენტრირებს E და H კომპონენტებს დროში, რასაც უწოდებენ **ნახტომის სქემას**. ყველა E გამოთვლა მოდელირებულ სივრცეში სრულდება და ინახება მეხსიერებაში კონკრეტული დროის მონაკვეთში, მანამდე შენახული H მონაცემების გამოყენებით. შემდეგ, ყველა H გამოთვლა სივრცეში სრულდება და ინახება მეხსიერებაში E გამოთვლილი მონაცემების გამოყენებით. ციკლი კვლავ იწყება E კომპონენტების ხელახალი გამოთვლით ახლად მიღებული H -ის საფუძველზე. ეს პროცესი გრძელდება მანამ, სანამ დროის ბიჯი არ დასრულდება.

Yee Algorithm



სურათი 2.2. Yee ალგორითმის სივრცე-დროის დიაგრამა ერთგანზომილებიანი ტალღის გავრცელების მაგალითზე, რომელიც გვიჩვენებს ცენტრალური სხვაობების გამოყენებას სივრცითი წარმომადგენლებისთვის და ნახტომს დროითი წარმომადგენლებისთვის. ელექტრული და მაგნიტური ველების საწყისი პირობები ნულოვანია ქსელში ყველგან.

2. 1. 2. სასრული სხვაობები და აღნიშვნები

YEE-მ შემოიტანა აღნიშვნები, რომელიც გამოიყენება სივრცის წერტილებისა და სივრცის და დროის ფუნქციებისათვის. ეს აღნიშვნა განზოგადებულია სამ სივრცულ განზომილებაში. ჩვენ სივრცის წერტილს ერთგვაროვან, მართკუთხა ბადეზე, აღვნიშნავთ როგორც

$$(i, j, k) = (i \Delta x, j \Delta y, k \Delta z) \quad (2.21)$$

აქ, Δx , Δy , და Δz არის, შესაბამისად, ბადის სივრცული ნაზრდი x , y და z კოორდინატთა ღერძების მიმართულებით, ხოლო i , j და k არის მთელი რიცხვები. გარდა ამისა, სივრცის და დროის ნებისმიერ ფუნქციას აღვნიშნავთ u -თი, რომელიც შეფასებულია ბადის დისკრეტულ წერტილში და დროის დისკრეტულ მომენტში, როგორც

$$u(i \Delta x, j \Delta y, k \Delta z, n \Delta t) = u_{i,j,k}^n \quad (2.21)$$

სადაც Δt არის დროის ნაზრდი, რომელიც მუდმივად ითვლება დაკვირვების ინტერვალზე და n არის მთელი რიცხვი.

Yee-მ გამოიყენა ცენტრალური სასრული-სხვაობების გამოსახულებები სივრცითა და დროით წარმომადგენლობისთვის, რომლებიც ორივე მარტივად დასაპროგრამებელია და მეორე რიგის სიზუსტე სივრცე და დროის ნაზრდში. განვიხილოთ ეს გამოსახულება u -ს პირველი სივრცითი კერძო წარმომადგენლობისთვის x -მიმართულებით, რომელიც შეფასებულია ფიქსირებულ დროში $t_n = n\Delta t$.

$$\frac{\partial u}{\partial x}(i\Delta x, j\Delta y, k\Delta z, n\Delta t) = \frac{u_{i+1/2,j,k}^n - u_{i-1/2,j,k}^n}{\Delta x} + O[(\Delta x)^2] \quad (2.23)$$

ყურადღება მივაქციოთ $\pm 1/2$ ნაზრდს u ფუნქციის i ქვეინდექსთან, რაც აღნიშნავს სივრცით სასრულ-სხვაობას $\pm 1/2\Delta x$ -ით x -ღერძის გასწვრივ. ცხადია, რომ Yee-მ (2.23) მიიღო (2.10b) (2.10a) - დან (მაგრამ ამ გამოსახულებებში Δx შეცვალა $\Delta x/2$ -ით), შემდეგ კი ამოხსნა $\partial u / \partial x$ -თვის. Yee-ის მიზანი იყო მეორე რიგის სიზუსტე ცენტრალური სხვაობაში, მაგრამ აშკარაა, რომ მას სურდა თავისი ცენტრალური სხვაობების მონაცემების აღება დაკვირვების წერტილიდან მარჯვნივ და მარცხნივ მხოლოდ $\Delta x/2$ - ით, და არა სრული Δx -ით. Yee-ემ აირჩია ეს აღნიშვნა, რადგან მას სურდა E და H

კომპონენტების მონაცვლეობა სივრცულ ბადეზე $\Delta x/2$ ინტერვალით. მაგალითად, ორი მიმდებარე E-კომპონენტის სხვაობა, რომლებიც გამოყოფილია Δx -ით და მდებარეობს $\pm 1/2 \Delta x$ ინტერვალზე H კომპონენტის ორივე მხარეს, გამოყენებული იქნება $\partial u / \partial x$ -ის რიცხვითი მიახლოების უზრუნველესაყოფად, რათა შესაძლებელი იყოს H კომპონენტის დროული ცვლილება. სისრულისთვის, უნდა დაემატოს, რომ რიცხვითი მიახლოება (2.23) -ის ანალოგიურად შეიძლება დაიწეროს $\partial u / \partial y$ და $\partial u / \partial z$, უბრალოდ u -ს j ან k ინდექსების გაზრდით $\pm 1/2 \Delta y$ -ით ან $\pm 1/2 \Delta z$ -ით, შესაბამისად.

Yee-ის გამოსახულებები u -ს პირველი დროით კერძო წარმოებულისთვის, რომელიც შეფასებულია სივრცის ფიქსირებულ წერტილში (i, j, k), შემდეგნაირად გამოდის ანალოგიით:

$$\frac{\partial u}{\partial t}(i\Delta x, j\Delta y, k\Delta z, n\Delta t) = \frac{u_{i,j,k}^{n+1/2} - u_{i,j,k}^{n-1/2}}{\Delta t} + O[(\Delta t)^2] \quad (2.24)$$

ახლა $\pm 1/2$ ნაზრდი არის u -ს n - ზეინდექსში (დროის კოორდინატი), რაც აღნიშნავს დროით სასრულ სხვაობას $\pm 1/2 \Delta t$ -ით t -ს გასწვრივ. Yee-მ აირჩია ეს აღნიშვნა, რადგან მას სურდა E და H კომპონენტების დროში ცვლილება $\pm 1/2 \Delta t$ ინტერვალთა ნახტომის ალგორითმის განხორციელება.

თავი I I I. პროგრამული უზრუნველყოფა

3.1. პროგრამული პაკეტი - FDTD Lab

FDTD Lab - მძლავრი მრავალფუნქციური პროგრამული უზრუნველყოფა, შექმნილია EM პროცესების მაღალი სიზუსტით სწრაფი სიმულაციისთვის მაღალი სიხშირის დიაპაზონში, რომელიც მოიცავს სხვადასხვა ფუნქციებს, როგორიცაა თერმული ანალიზი და SAR გამოთვლა. FDTD Lab გთავაზობთ ეფექტურ და მოსახერხებელ გზას რთული გეომეტრიის ბადეების იმპორტისა და დამუშავებისთვის, რომლებიც გამოიყენება რიცხვით სიმულაციებში (კომპიუტერული მოდელირებისას). ეს ყველაფერი შეფუთულია Windows-ზე დაფუძნებულ მოსახერხებელი ინტერფეისით, რომელიც უზრუნველყოფს FDTD Lab პროგრამული უზრუნველყოფის ეფექტური მანიპულირებისთვის აუცილებელ ძირითად ფუნქციებს.

FDTD Lab არის სრულად აღჭურვილი პროგრამული უზრუნველყოფა EM და თერმული ანალიზისთვის. იგი მხარს უჭერს საინტერესო სტრუქტურების შეყვანის სხვადასხვა გზებს, დაწყებული სტერეოლითოგრაფიისა და ნასტრანის ფაილების იმპორტით, მომხმარებლის მიერ გენერირებული სტრუქტურების მოსახერხებელ ინტერფეისამდე. მძლავრი გრაფიკული უკუკავშირი (გამოსავალი) ძლიერ ამარტივებს მომხმარებელთან კავშირს, ხოლო სკრიპტის აპარატის მხარდაჭერა იძლევა სრული ავტომატიზაციის შესაძლებლობას.

EM სიმულაცია შესრულებულია დროთ არეში სასრული სხვაობების - Finite-Difference Time-Domain მეთოდის (FDTD) შესაბამისად. იგი მოიცავს სასაზღვრო პირობების ერთობლიობას კალკულაციის არეში ველების ზუსტი გამოკვლევისთვის, ასევე შორი ველის გამოსხივების დიაგრამის შესაფასებლად. FDTD Lab პროგრამული უზრუნველყოფა მხარს უჭერს მართკუთხა ბადეების ორ ტიპს (ერთგვაროვანი და ადაპტირებული) სხვადასხვა მასალისგან შემდგარი საინტერესო სტრუქტურებით, რაც მიუთითებს მათ ფიზიკურ თვისებებზე. გამოთვლების პროცესი მოიცავს ობიექტების კომპლექტს, როგორიცაა ლითონის მავთულები, ფირფიტები, სფეროები, სხვადასხვა განივი კვეთის მილები, ელემენტები და ა.შ... სხვადასხვა დანიშნულების

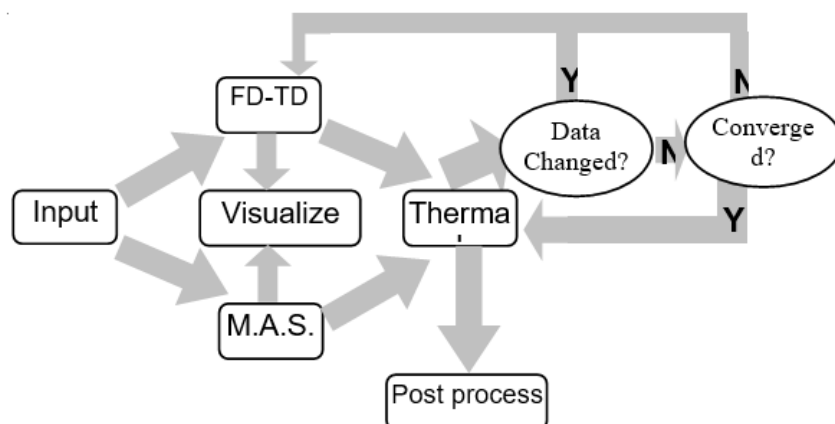
სენსორების დიდი რაოდენობა გაძლევთ შესანიშნავ შესაძლებლობას არა მხოლოდ დააკვირდეთ კომპიუტერული სიმულაციის საბოლოო შედეგს, არამედ სხვადასხვა EM/თერმული პარამეტრების შეფასების მონიტორინგის შესაძლებლობას გაშვების დროს სივრცის სხვადასხვა წერტილში! მიუხედავად იმისა, რომ ოპტიმიზებული სერიალიზაციის ტექნიკა საშუალებას გაძლევთ შეინახოთ შეფასებული მონაცემები მომავალი გამოყენებისთვის!

FDTDLab-ის მოსახერხებელი ინტერფეისი უზრუნველყოფს პროგრამულ უზრუნველყოფასთან მუშაობის მოსახერხებელ გზას, რაც ამცირებს ძირითადი ფუნქციების შესასწავლად საჭირო დროს. ეს ხდის FDTDLab-ს ხელმისაწვდომს და სასარგებლოს ყველასთვის, ვინც დაინტერესებულია EM და თერმული ანალიზით. დისერტაციის ფარგლებში დაგეგმილი ამოცანების განსახორციელებლად გამოიყენება კომპიუტერული პროგრამული პაკეტი (მოშიაშვილი, 2006), რომელიც შეიქმნა თსუ-ს გამოყენებითი ელექტროდინამიკის და რადიოინჟინერიის ლაბორატორიაში (**წარმოადგენს ლაბორატორიის საკუთრებას**). აღნიშნულმა პროგრამულმა პაკეტმა მოგვცა საშუალება ამოგვეხსნა ელექტროდინამიკული ამოცანა ემ ველით დასხივებისას ისეთ რთულ და არაერთგვაროვან ობიექტში, როგორიც არის ადამიანი. ბუნებრივია, მასში გათვალისწინებული უნდა იყოს რაც შეიძლება სრული ანალიზის ჩატარების საშუალება. ჩვენს მიერ გამოყენებული პროგრამული პაკეტის გამოყენების არე უფრო ფართოა და არ შემოიფარგლება მხოლოდ ერთი ტიპის ამოცანის ამოხსნით. ეს პაკეტი შეიძლება გამოყენებულ იქნას, მაგალითად, ფაქიზ ემ ხელსაწყოებში ხელსაწყოს ცალკეულ ნაწილში, სითბური დანაკარგების გამო, ტემპერატურის მატების დათვლისათვის. პროგრამა დაწერილია C++ პროგრამულ ენაზე Microsoft Windows ოპერატიული სისტემისთვის. პროგრამა სრულიად ობიექტზე ორიენტირებულია, რაც ახალი ობიექტების და შესაძლებლობების დამატების საშუალებას იძლევა უკვე დაწერილი კოდის ხელახალი გადაწერის გარეშე.

დასმული ამოცანების სირთულე არ იძლევა ამოცანის ერთ ეტაპად ამოხსნის საშუალებას, ამიტომ გამოყენებულია შემდეგი სქემა:

1. პირველ ეტაპზე ხდება დასათვლელი ამოცანის გეომეტრიის გენერირება
2. შეირჩევა ემ ველის აგზნების წყარო და ფორმა.
3. ირთვება FDTD ძრავა.
4. ემ ველების „ჩამოჭრა“ დასათვლელი ზონის საზღვრებზე ხდება მურის II რიგის პირობების, ან იდეალურად შეთანხმებული არააქსიალური ფენების მეთოდის გამოყენებით.
5. ძრავის მუშაობის პროცესში და მუშაობის დამთავრების შემდეგ ხდება მიღებული შედეგების ვიზუალიზაცია.
6. ემ ძრავის მიერ დათვლილი SAR მიშვნელობა მიეწოდება ბიო-სიტბოს ძრავას, რომელიც ითვლის ტემპერატურას.
7. ეს პროცესი მიმდინარეობს მანამ, სანამ არ დამყარდება სიტბური წონასწორობა.
8. მიღებული შედეგების ვიზუალიზაცია და ანალიზი.

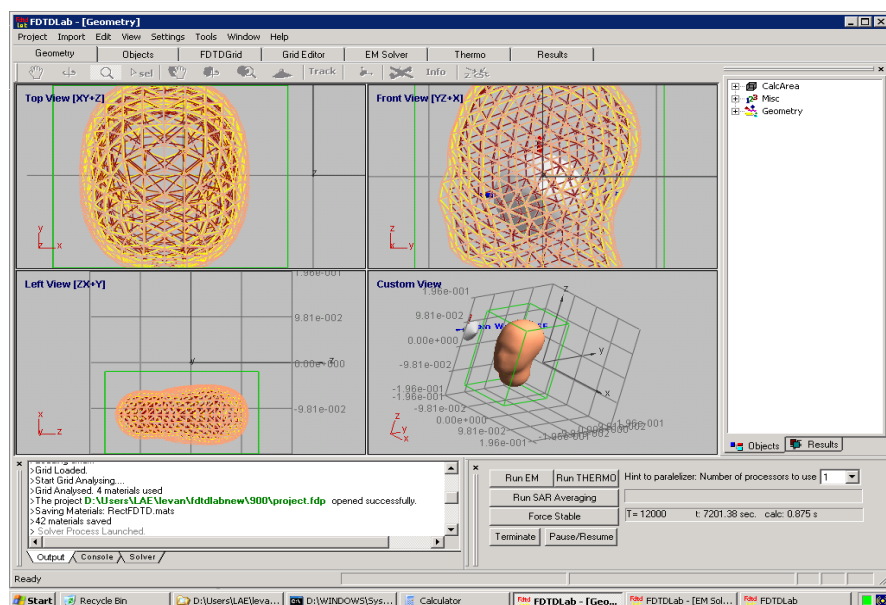
ემ ველის გამოთვლითი მეთოდი და პროგრამული კოდი, ეფუძნება დროით არეში სასრული სხვაობების მეთოდისა (FDTD) და დამხმარე გამომსახივებლების მეთოდის (MAS) გამოყენებას მაქსველის განტოლებებისათვის, (შოშიაშვილი 2006) სიტბური მოვლენების მოდელირება და ანალიზი კი ბიო-სიტბოს განტოლებას. FDTD მეთოდი საშუალებას იძლევა შესწავლილ იქნას რთული არაერთგვაროვანი ობიექტები (შოშიაშვილი 2006).



სურათი 3.1.1. პროგრამის კომპონენტები

FDTD მეთოდით მიღებული SAR-ის განაწილება შემდეგ მიეწოდება "ბიო-სიტბოს ძრავას", რომელიც ითვლის SAR-ით (შთანთქმული ემ ველის ენერგიით) გამოწვეულ ტემპერატურის მატებას. ზოგადად, FDTD მეთოდს არ გააჩნია საშუალება შეაფასოს სიზუსტე, რომლითაც მოხდა დათვლა. ამიტომ, FDTD მეთოდით დათვლის სიზუსტე მოწმდება იგივე, ოღონდ ერთგვაროვანი ამოცანის MAS (დამხმარე გამომსახივებლების მეთოდი)-ითა და FDTD მეთოდებით მიღებული შედეგების შედარებით, ვინაიდან MAS საშუალებას გვაძლევს დავადგინოთ მიღებული შედეგების სიზუსტე. ასევე, ერთგვაროვანი ან უბან-უბან ერთგვაროვანი სხეულების შემთხვევაში, უფრო რაციონალურია გამოყენებულ იქნას MAS ალგორითმი, ვიდრე FDTD გამოთვლითი დროის, სიზუსტისა და კომპიუტერული რესურსების თვალსაზრისით. როგორც ზემოთ ავღნიშნეთ, SAR გაზომვა ცოცხალი ორგანიზმებისათვის რთულია და ხშირად შეუძლებელიც. გამოყენებული პროგრამული პაკეტი, SAR მნიშვნელობის გამოთვლის საშუალებასა და ემ ურთიერთქმედებით გამოწვეული ტემპერატურის მატების წინასწარმეტყველების საშუალებას იძლევა. პროგრამის კომპონენტები და მათ შორის ურთიერთობის სქემა მოცემულია სურ. 3.1.1-ზე.

უპირველეს ყოვლისა, საჭიროა ამოცანის გეომეტრიული მოდელის შექმნა. ამისათვის პროგრამულ პაკეტს გააჩნია გეომეტრიის რედაქტორი. შესაძლებელია სხვა პროგრამებით შექმნილი მოდელების იმპორტირება. მაგალითად, ფორმატები როგორიცაა: *STL, NASTRAN* (სურ. 3.1.2).

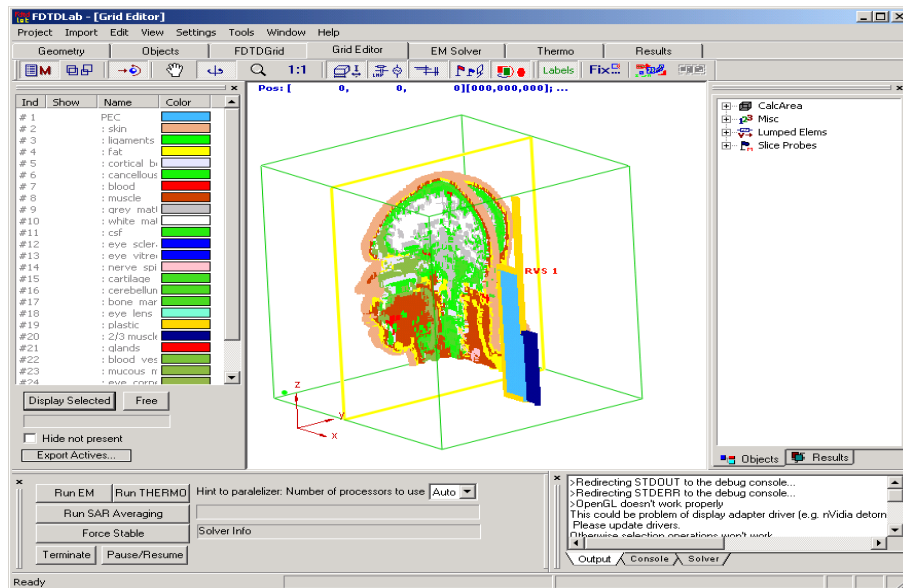


სურათი 3.1.2. იმპორტირებული STL მოდელი

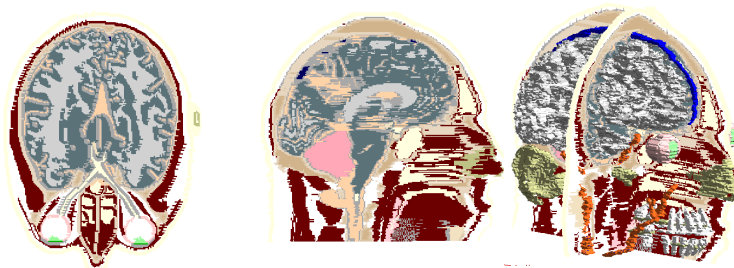
გეომეტრიის რედაქტორში, ისეთი სტანდარტული ოპერაციების გარდა როგორიცაა წაშლა, კოპირება, ტრანსფორმაცია, ბრუნვა, სკალირება, შემოტანილია 2 ასევე 1 შედგენილი ობიექტის ცნება (Compound Object). ესაა ელემენტარული ობიექტები გაერთიანებული ერთ დიდ ჯგუფში, რომელიც თავისთავად წარმოადგენს ერთ ობიექტს. ეს მეტისმეტად მოხერხებულია როგორც რთული, ასევე პერიოდული ობიექტების შექმნა-რედაქტირებისათვის. მომხმარებელს ყოველ ნაბიჯზე შეუძლია ყოველი ტრანსფორმაციის რედაქტირება/შეცვლა. ოპერაციები შეიძლება ჩატარებულ იქნას როგორც მაუსით, ასევე კლავიატურის ან JavaScript-ის ენაზე დაწერილი ფუნქციების საშუალებით.

ასევე, შესაძლებელია მსგავსი პროგრამის – XFDTD, შემავალი გეომეტრიის ფაილის იმპორტირება. გათვალისწინებულია გამოთვლითი ძრავისთვის გენერირებული ბადის ვიზუალიზატორი/-რედაქტორი. ეს კომპონენტი საშუალებას იძლევა:

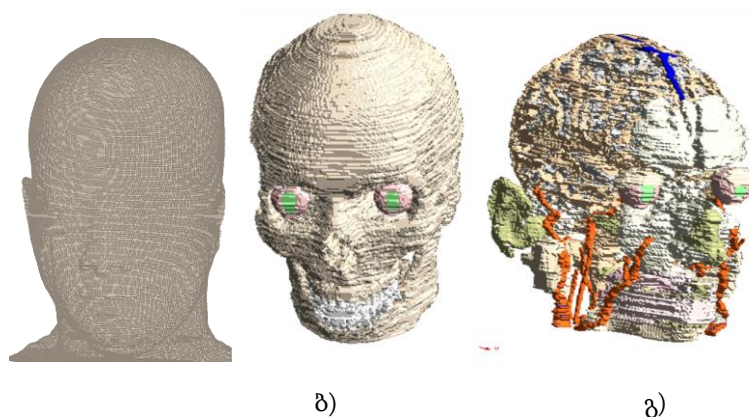
1. ვნახოთ გენერირებული ბადე სხვადასხვა სიბრტყეებში.
2. ვნახოთ და დარედაქტირდეს დასათვლელ ბადეში წინაღობის, ტევადობის, ინდუქტივობის ელემენტები, ასევე წვრილი მავთულები და ლითონის ფირფიტები.
3. გენერირებულ ბადეზე მომხმარებელმა შეცვალოს ნივთიერებები ყოველ უჯრაში ან მონიშნულ უჯრათა ჯგუფში.
4. "ჩართოს/გამორთოს" სხვადასხვა ნივთიერებები და ნახოს მოდელის სამ განზომილებიანი სურათი.



სურათი 3.1.3. იმპორტირებული XFDTD მოდელი



სურათი 3.1.4. თავის მოდელის კვეთები სხვადასხვა სიბრტყით



ა)

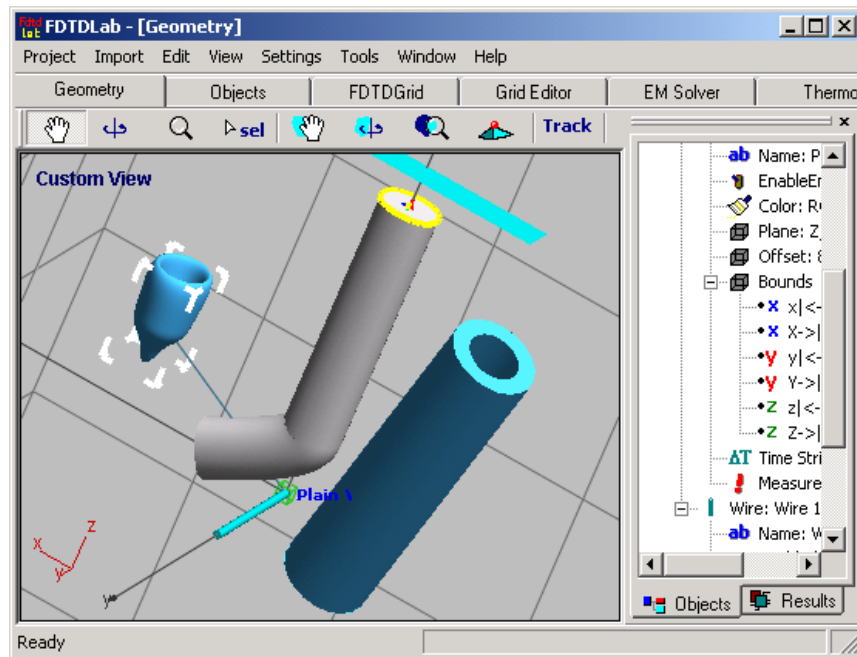
ბ)

გ)

სურათი 3.1.5. თავის მოდელის მოცულობითი სურათი: ა) კანი, ბ) "გამორთულია" კანი, კუნთები-ძვლები, გ) ძვლოვანი-ხტილოვანი სისტემა და თვალეები.

მომხმარებელს შეუძლია ელემენტარული ობიექტების შექმნა და რედაქტირება (სფერო, კუბი, ბრუნვითი სხეულების გენერაცია), ასევე Pipe და Tube.

განსაკუთრებული ყურადღება ეთმობა ლითონის ობიექტებს, კერძოდ წვრილ მავთულს და თხელ ლითონის ფირფიტას. ეს ორი ობიექტი არ მონაწილეობს უშუალოდ ბადის გენერირებისას, მაგრამ იწერება საჭირო ინფორმაცია მათი ბადესთან კავშირის შესახებ, რასაც შემდგომში ითვალისწინებს ემ ძრავა (შოშიაშვილი 2006).



სურათი 3.1.6. სხვადასხვა ტიპის ობიექტები: ბრუნვითი სხეული, Pipe, Tube, წვრილი მავთული, მეტალის ფირფიტა

3. 1. 1. FDTD Lab პროგრამის მომხმარებლის ინტერფეისი

MENUS

Project Import Edit View Settings Window Help

მთავარი მენიუ მდებარეობს FDTD Lab ფანჯრის ზედა ნაწილში. ძირითადად გამოიყენება ინტერფეისის მოსაწყობად, ის ასევე უზრუნველყოფს რამდენიმე ძირითად ფუნქციონალს პროექტის დასამუშავებლად.

Project

Project Import Edit View Settings Window Help

New ...
Open...
Save
Save As...
Close

1 Half Wavelength Dipole (HWD) & a truncated sphere

Exit

New – ქმნის ახალ პროექტს. თქვენ მოგეთხოვებათ მიუთითოთ თქვენთვის საინტერესო პროექტის სახელი.

Open... – ხსნის ბრაუზერის ფანჯარას, მოსახერხებელი აღწერილობით-სახით, არსებული პროექტის დასადგენად და ჩატვირთვისთვის.

თქვენ ასევე შეგიძლიათ აირჩიოთ ერთი ან მეტი *ახლაზან გახსნილი პროექტი*.

Save – ინახავს მიმდინარე პროექტს როგორც არის.

Save As... - ინახავს მიმდინარე პროექტს. თუმცა, თქვენ მოგეთხოვებათ მიუთითოთ პროექტის სახელი, რათა შეინახოთ მიმდინარე სახით.

Close – ხურავს მიმდინარე პროექტს. მოგეთხოვებათ შეინახოთ ყველა ცვლილება ბოლო შენახვის პროცედურის შემდეგ.

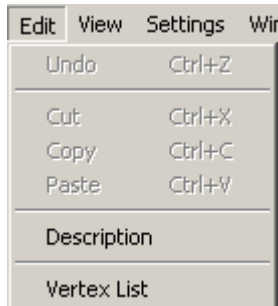
Exit – გადის პროგრამული უზრუნველყოფიდან (მოგეთხოვებათ ცვლილებების შენახვა)

Import

Geometry ▶
Object ▶
Sensors ▶

ეს მენიუ გამოიყენება კალკულაციის არეში გეომეტრიის/ობიექტების/სენსორების იმპორტისთვის. ყველა ობიექტი იყოფა ჯგუფებად მათი დანიშნულებისა და თვისებების გამო. თითოეული ქვეპუნქტი მოგვიანებით განიხილება შესაბამის თავებში.

Edit



Undo – გააუქმებს ბოლო მოქმედებას.

Cut – ჭრის არჩეულ ნაწილებს სცენიდან.

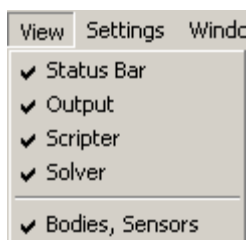
Copy – აკოპირებს შერჩეულ ნაწილებს.

Paste – ჩასვავს კოპირებულ ნაწილებს.

Description – ხსნის *html* ედიტორს, სადაც შეგიძლიათ შექმნათ პროექტის არასავალდებულო/არჩევითი აღწერა.

Vertex List – მართლაც ძალიან სასარგებლო ინსტრუმენტია, რომელსაც შეუძლია შეინახოს ხშირად გამოყენებული.

View



Status Bar – ცვლის სტატუსის ზოლს ON/OFF

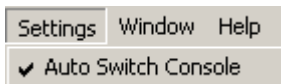
Output – გადართავს გამომავალ ფანჯარას ON/OFF

Scripter – ცვლის სკრიპტერის ფანჯარას ON/OFF

Solver – ცვლის ამომხსნელის მართვის პანელს ON/OFF

Bodies, Sensors – **BST** ON/OFF

Settings



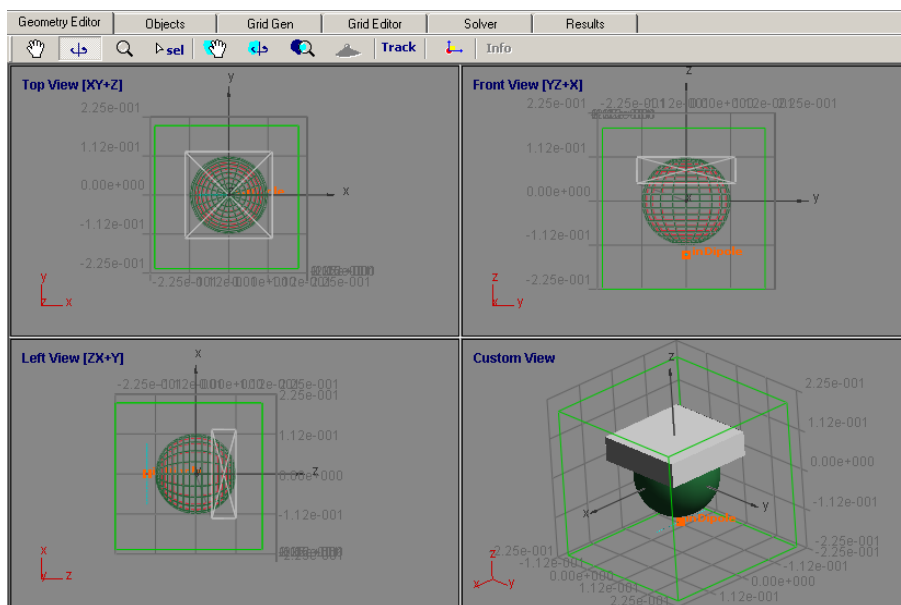
Auto Switch Console – გამომავალი კონსოლი შედგება 3 სიისგან: „Output“, „Console“ და „Solver“. თუ "Auto Switch Console" რეჟიმი ჩართულია, ფანჯარა ავტომატურად გადადის 3 სიიდან რომელიმეზე, რადგან მას ემატება ნებისმიერი ინფორმაცია. წინააღმდეგ შემთხვევაში, თქვენ უნდა შეცვალოთ სიები ხელით, რათა დააკვირდეთ ნებისმიერ ცვლილებას.

Window – აკონტროლებს ფანჯრების განლაგებას.

Help – ძირითადად ეს არის დახმარების სისტემაზე წვდომის მთავარი გზა.

WINDOWS

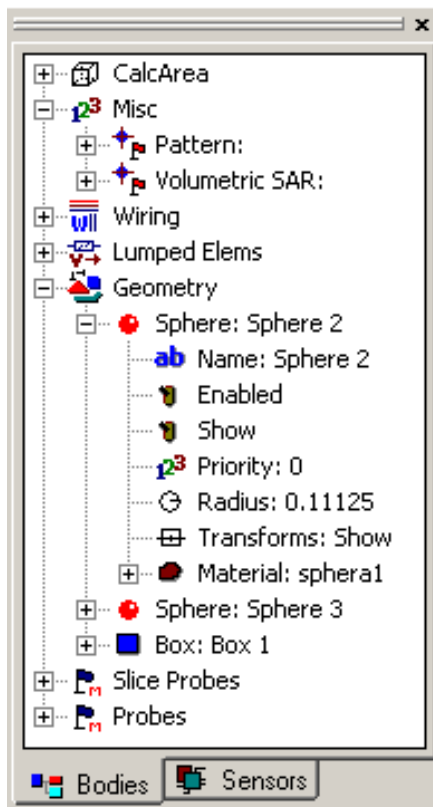
“Main Workspace”



Workspace-ის მთავარი ფანჯარა არის არე, სადაც თითქმის ყველა მომხმარებლის ინტერაქცია ხდება. იგი შედგება 7 ნაწილისაგან:

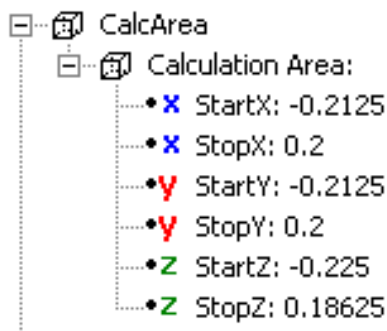
- გეომეტრიის რედაქტორი,
- ობიექტების რედაქტორი,
- ბადის გენერატორი,
- ბადის რედაქტორი,
- ამომხსნელი და
- შედეგების ხედვის ფანჯარა.

სხეულები, სენსორების ხე (Bodies, Sensors Tree)



BODIES:

Bodes ჩანართი შეიცავს ყველა ობიექტის სრულ ჩამონათვალს (მათ თვისებებთან ერთად), რომლებიც ამჟამად წარმოდგენილია პროექტში:



Calc Area – ინახავს FDTD კალკულაციის არის საზღვრებს

Misc – შეიცავს Pattern და Volumetric SAR

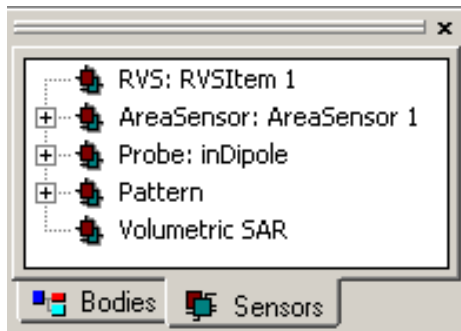
Wiring – მავთულები მათი თვისებებით

Lumped Elements – რეზისტორები, ინდუქტორები...

Geometry – ოთხკუთხედები, სფეროები...

Slice Probes – არეს სენსორები და ენერგიის ნაკადის სენსორები

Probes – წერტილივით ზონდები



SENSORS:

სენსორების ჩანართი შეიცავს ყველა აქტიური სენსორის ჩამონათვალს, მათი გამოთვლების შედეგებით:

RVS – RVS პარამეტრები

Area Sensor – შესაბამისი არეა-სენსორის მიერ მიღებული მონაცემები

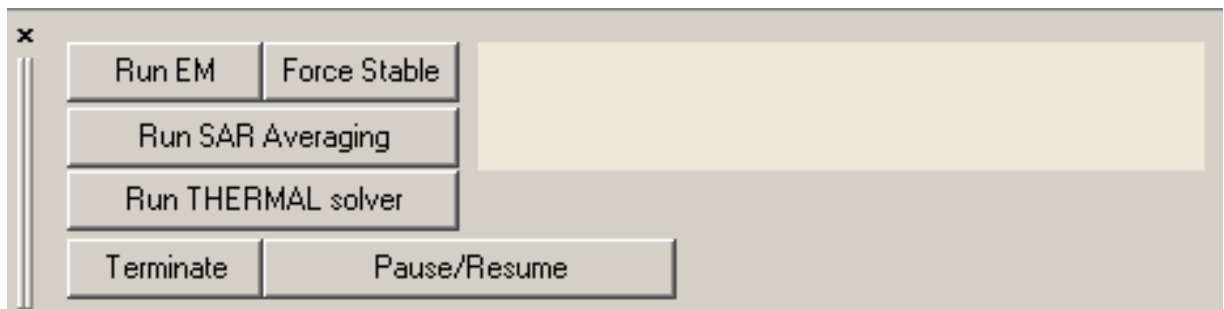
Probe – point probes' მონაცემები

Pattern – აჩვენებს შორ ველს

Volumetric SAR – გამოაქვს volumetric SAR განაწილება.

თითოეული ობიექტისა და სენსორის თვისებები, მათ ძირითად მახასიათებლებთან ერთად, შეგიძლიათ იხილოთ ამ დოკუმენტის შესაბამის ნაწილებში.

Control Panel



მართვის პანელი შეიცავს ღილაკებს, რომლებიც გამოიყენება ამოხსნის პროცესის დასამუშავებლად:

Run EM – ატარებს EM ანალიზს

Run SAR Averaging - აწარმოებს SAR-ს გასაშუალებას, IEEE სტანდარტის მიხედვით

Run THERMAL solver – იწყებს თერმული ანალიზი

Force Stable - ატყუებს ამომხსნელს, აიძულებს მას იფიქროს, რომ სტაბილურობა მიღწეულია

Terminate - დაუყოვნებლივ აჩერებს გამოთვლას, რაც იწვევს ყველა დაგროვებული ინფორმაციის გამოუსწორებელ დაკარგვას

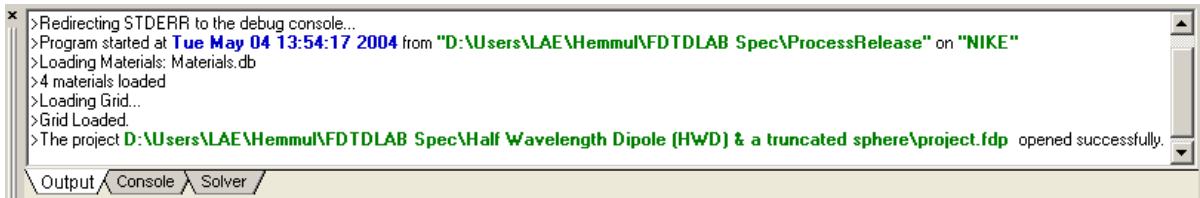
Pause/Resume - აჩერებს/აგრძელებს გამოთვლის პროცესს. პროგრესის ზოლი მიუთითებს მიმდინარე სტაბილურობის მდგომარეობაზე. როდესაც ის მთლიანად ივსება - სტაბილურობა მიიღწევა და გამხსნელი გადადის სტაბილურობის შემდგომ ოპერაციებზე. რიცხვითი სტაბილურობის ინფორმაცია გამოტანილია ქვემოთ.

Scripting window



Windows-ის სკრიპტირება საშუალებას აძლევს FDTD ამომხსნელთან ურთიერთქმედებას სკრიპტირების მანქანაში.

Output Window



გამომავალი ფანჯარა შედგება 3 ჩანართისგან:

Output – არის ყველა ინფორმაციის სამიზნე, რომელიც წარმოიქმნება გაშვების დროს.

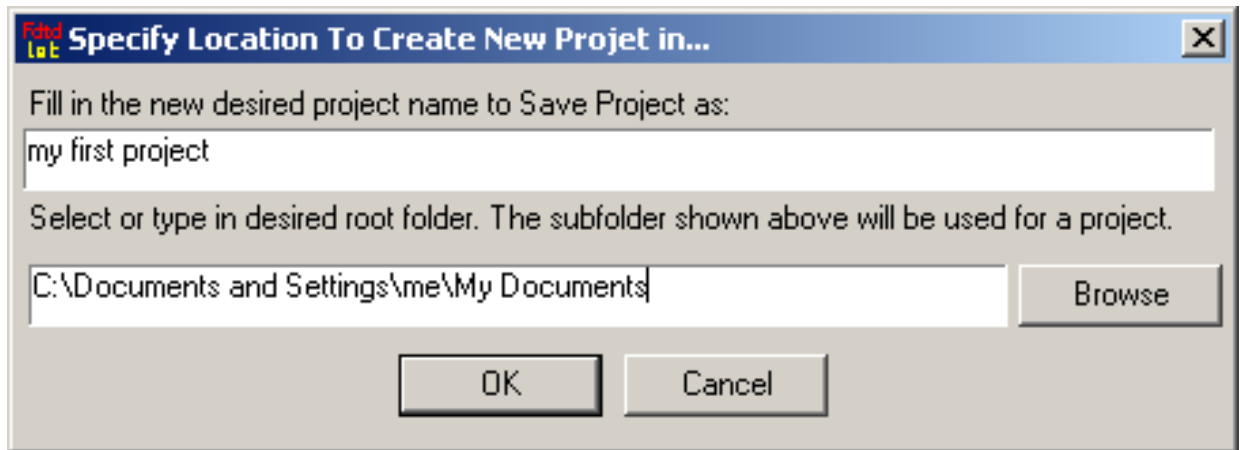
Console – ზოგიერთი კომპონენტი აგზავნის კონსოლის გამომავალს ამ ფანჯარაში.

Solver – ეს ჩანართი იღებს ამომხსნელის მიერ გამოგზავნილ ინფორმაციას ამომხსნის პროცესის დროს - მაგალითად, ინფორმაციას თითოეული ნაბიჯის შესახებ FDTD დროის ბიჯირების დროს.

PROJECT

CREATING NEW PROJECT

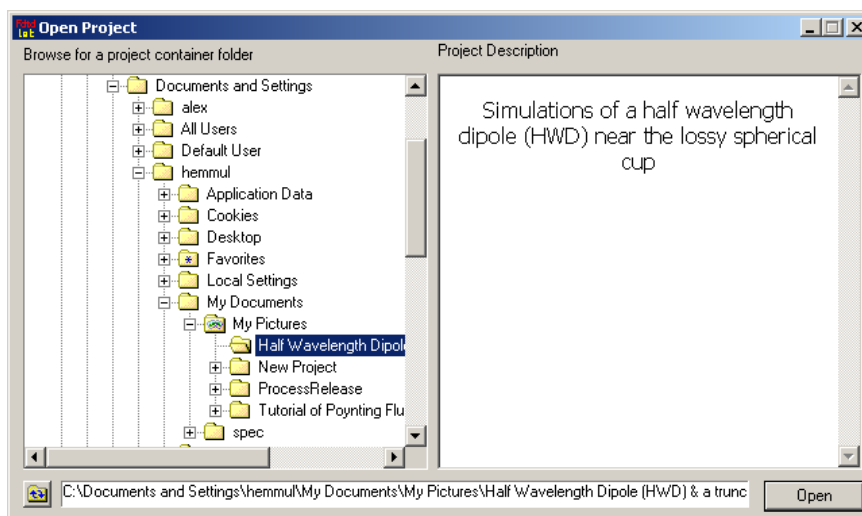
ახალი FDTDLab პროექტი იქმნება მთავარი მენიუს პუნქტის „პროექტი“ - > „ახალი...“ არჩევით. შემდეგი დიალოგური ფანჯარა გამოჩნდება



სადაც გთხოვენ შეიყვანოთ ახალი პროექტის სახელი და ადგილმდებარეობა, სადაც ის შეიქმნება. "OK"-ზე დაწკაპუნება იწვევს ნაგულისხმევი ცარიელი პროექტის შექმნას (გეომეტრიის გარეშე, სენსორების გარეშე ...). კალკულაციის არე დაყენებულია $[-1; 1]$ თითოეულ საკოორდინატო ღერძში.

LOADING AN EXISTING PROJECT

არსებული პროექტის ჩასატვირთად აირჩიეთ "ჩატვირთვა" მენიუდან "პროექტი". შემდეგი დიალოგური ფანჯარა გამოჩნდება:



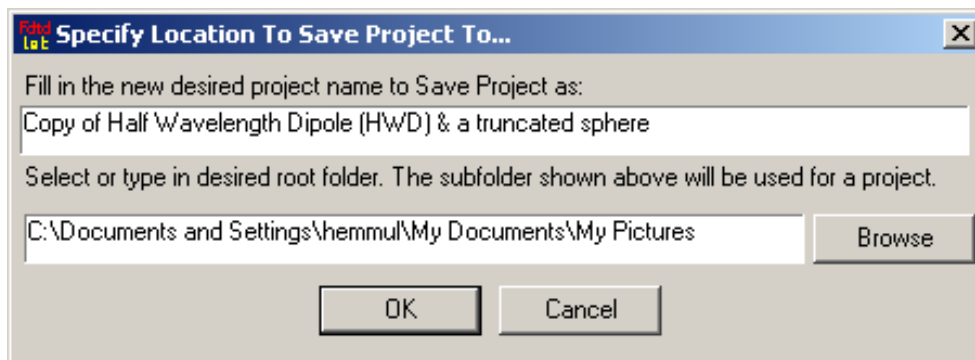
თქვენ შეგიძლიათ გამოიყენოთ მარცხენა ფანჯარა საჭირო პროექტის მოსაძებნად, ან შეიყვანოთ ბილიკი "ბოქსის/Box"-ის ბოლოში. მარჯვენა ფანჯარაში ნაჩვენებია

პროექტის აღწერა. აღწერა არის არასავალდებულო მომხმარებლის მიერ შექმნილი ***.html** ფაილი, რომელიც დაკავშირებულია პროექტთან, რაც აადვილებს მის იდენტიფიკაციას. დააწკაპუნეთ "გახსნა/Open" პროექტის ჩასატვირთად.

SAVING CURRENT PROJECT

პროექტის შენახვის ორი გზა არსებობს:

- ა) შეინახეთ პროექტი მიმდინარე სახელით: უბრალოდ დააწკაპუნეთ „შენახვა“ მენიუში „პროექტი“.
- ბ) შეინახეთ პროექტი სხვა სახელით. ამ მიზნით აირჩიეთ "შენახვა როგორც ..." "პროექტის" მენიუდან. თქვენ მოგეთხოვებათ პროექტის ახალი სახელი და ადგილმდებარეობა:



"OK"-ზე დაჭერით ინახავს პროექტს. "გაუქმება" - ხურავს ფანჯარას, მეტს არაფერს აკეთებს.

PROJECT DESCRIPTION

პროექტის აღწერა არის ***.html** ფაილი, რომელიც სურვილისამებრ შეიძლება დაემატოს პროექტს უფრო ადვილი იდენტიფიკაციისთვის. ის ჩვეულებრივ იქმნება მომხმარებლის მიერ ხელით და შეიძლება შეიცავდეს ნებისმიერ ინფორმაციას. პროექტის აღწერილობის შესაცვლელად აირჩიეთ "აღწერა" მენიუდან "რედაქტირება". თქვენ გადამისამართდებით ნაგულისხმევ რედაქტორზე, სადაც შესაძლებელია საჭირო ვებ-გვერდის შექმნა. პროექტის ჩატვირთვისას მისი აღწერა ჩანს დიალოგურ ფანჯარაში "გახსნა"

OBJECTS

ეს განყოფილება აღწერს ობიექტებს, რომლებიც შეიძლება იყოს იმპორტირებული FDTD ბადეზე და გამოიყენონ გამოთვლებში. თითოეული დათვლა არის რეალური

ფიზიკური პროცესის სიმულაცია, ამიტომ ის მოითხოვს რეალურ ცხოვრებაში არსებული ობიექტების ციფრული ინტერპრეტაციის ხელმისაწვდომობას. FDTDLab გთავაზობთ შემდეგი ძირითადი ტიპის ობიექტებს: მარტივ გეომეტრიულ სხეულებს, რომლებსაც აქვთ გარკვეული ფიზიკური თვისებები (ელექტრული და მაგნიტური გამტარობა, სიმკვრივე...), მიკროსქემის ელემენტები (რეზისტენტული ძაბვის წყაროები, კონდენსატორები, ინდუქტორები...) და სენსორები. ინფორმაცია სივრცის ნებისმიერ წერტილში, გაშვების დროს და შედეგების გამოტანა ამოხსნის პროცესის შემდეგ! თითოეულ ობიექტს აქვს საკუთარი მიზნები და თვისებები.

OBJECTS' PROPERTIES

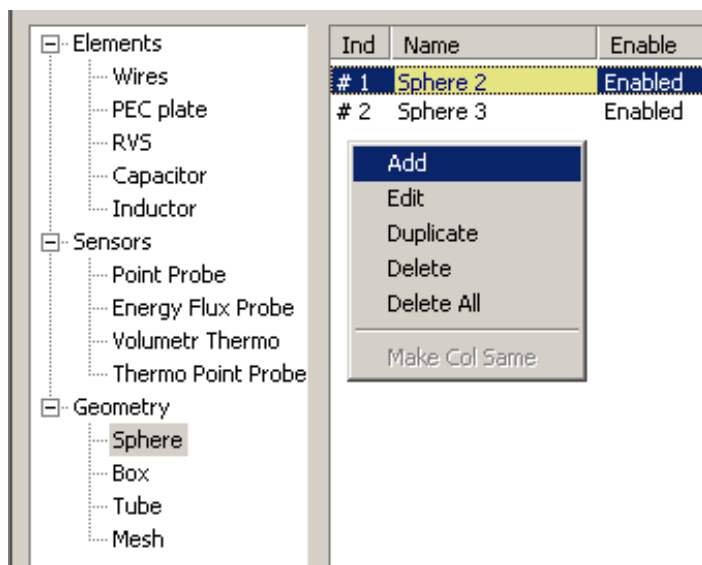
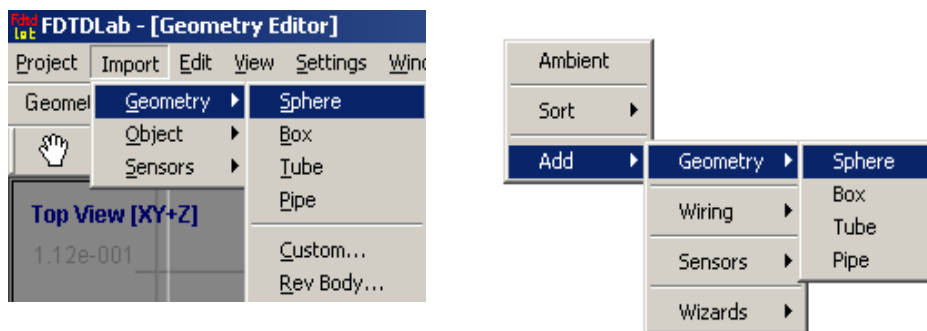
თითოეულ ობიექტს, FDTDLab-ის კონტექსტში, აქვს თავისი თვისებები. ობიექტების მრავალფეროვნების გათვალისწინებით, შეუძლებელია ზოგადი ესკიზის გაკეთება, მაგრამ ზოგიერთი ძირითადი თვისება, რომლებიც საერთოა ყველა ობიექტისთვის, არის:

name – სახელი გამოიყენება მოხერხებულობისთვის, ანუ თქვენ შეგიძლიათ სურვილისამებრ მიანიჭოთ ნებისმიერი სახელი ნებისმიერ ობიექტს, რაც გაადვილებს მის შემდგომ იდენტიფიკაციას.

enable/disable – ობიექტები შეიძლება დაემატოს პროექტს, მაგრამ ეს არ ნიშნავს, რომ ისინი მხედველობაში მიიღება ამოხსნის პროცესში. *ჩართვა/გამორთვა* აცნობებს ამომხსნელს, გამოყენებული იქნება თუ არა ეს ობიექტი ამოხსნის პროცესში. ეს ძალიან სასარგებლოა იმ შემთხვევაში, თუ თქვენ შექმენით რთული ობიექტი მოსახერხებელი თვისებებით, მაგრამ ეს არ ჩანს საჭირო მომავალ გაანგარიშებაში/დათვლაში. *წაშლის* ნაცვლად - უბრალოდ გადართეთ მისი მდგომარეობა *გათიშულზე*! ახლა, როცა მისი დრო დადგა - დააბრუნეთ მდგომარეობა *ჩართული* - შეინახეთ.

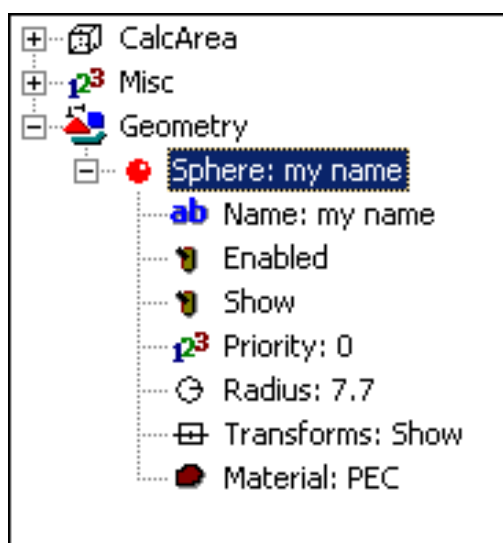
GEOMETRY

Sphere



კალკულაციის არეში სფეროს ჩასასმელად, მთავარი მენიუდან აირჩიეთ Import->Geometry->Sphere, Objects->Elements->Sphere, ან დააწკაპუნეთ მაუსის მარჯვენა ღილაკით „სხეულები, სენსორების ხეზე“ და აირჩიეთ Add->Geometry->Sphere. ობიექტი - სფერო ემატება სიას "სხეულები, სენსორების ხე".

სფეროს აქვს შემდეგი თვისებები:



name – აიღეთ ის, რაც გსურთ

enabled/disabled state – განიხილება ეს სფერო FDTD გამოთვლებში?

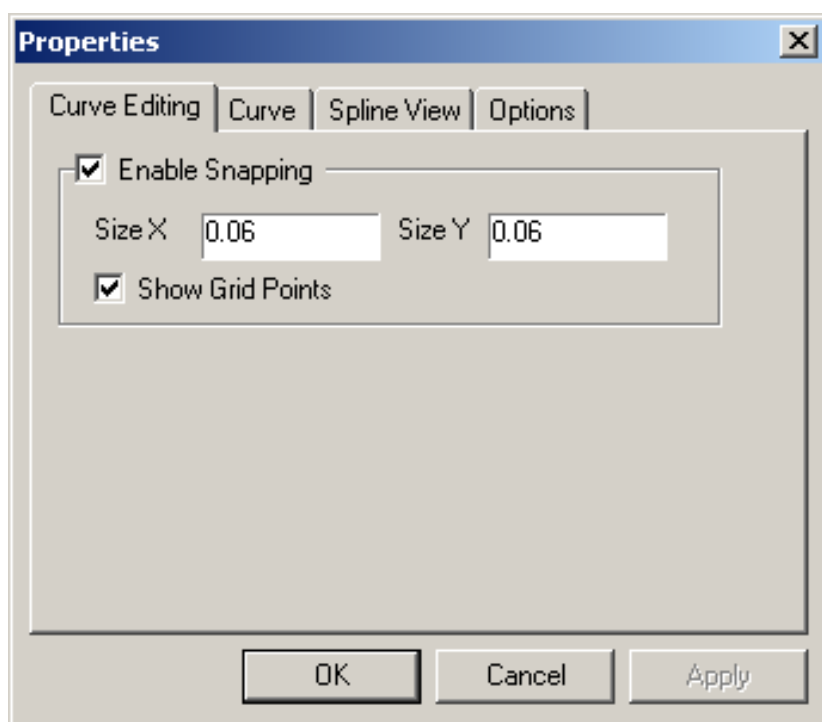
show/hide state – სფერო უნდა იყოს ნაჩვენები სცენაზე (გეომეტრიის რედაქტორი)?

priority – უფრო მაღალი პრიორიტეტის მქონე ობიექტი აჭარბებს ქვედა ობიექტს, სივრცის ნებისმიერ წერტილში, სადაც ისინი ერთმანეთს ემთხვევა.

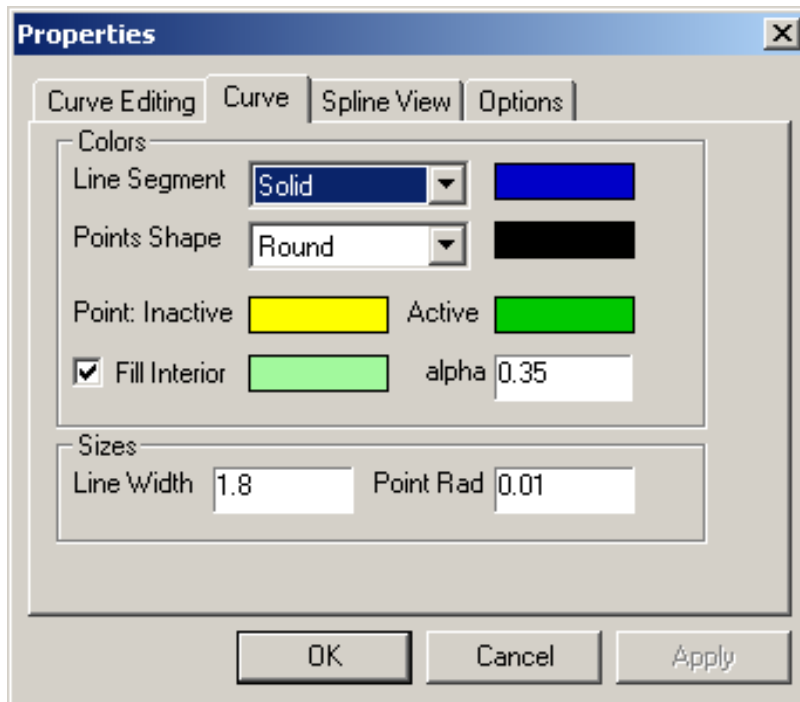
radius – სფეროს რადიუსი, მსოფლიო კოორდინატებში

transforms – მოძრაობს / მასშტაბებს / ბრუნავს (ზემოთ სურათზე - არ არსებობს, ამიტომ სფერო მდებარეობს კოორდინატთა სათავეში)

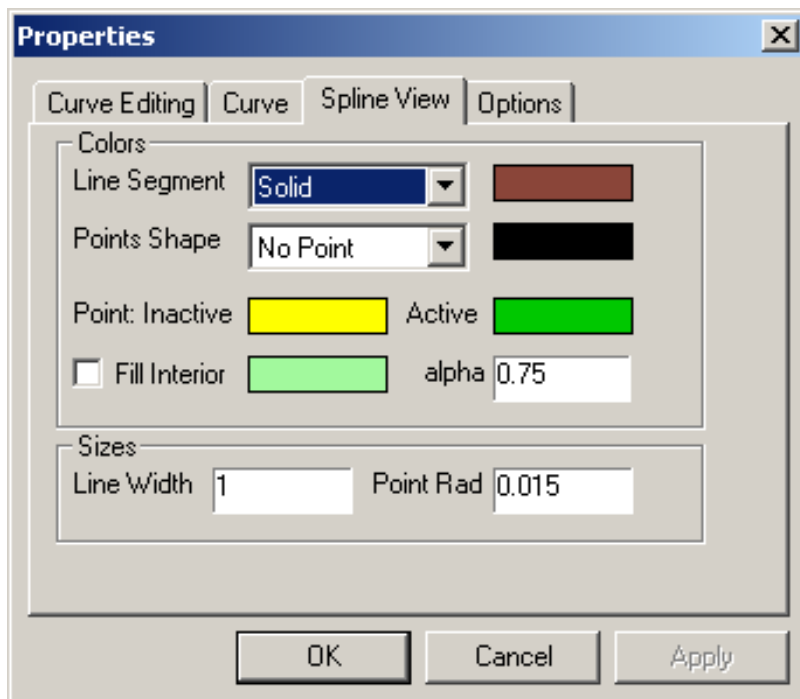
materials – სფეროს მასალა (ამ შემთხვევაში ეს არის კარგი ელექტროგამტარი)



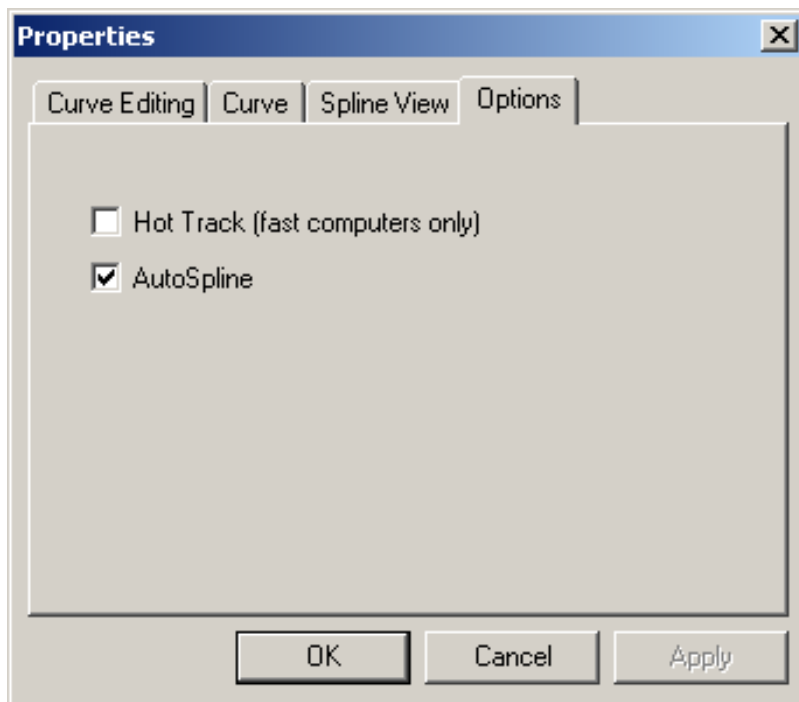
- არის საკონტროლო წერტილები ერთგვაროვან ბადეზე? თუ კი, გთხოვთ, მიუთითოთ ბადის უჯრედის ზომები.



- დააყენეთ როგორ გამოჩნდება ხაზი, რომელიც აკავშირებს საკონტროლო წერტილებს.



- დააყენეთ, თუ როგორ გამოჩნდება bi-spline.



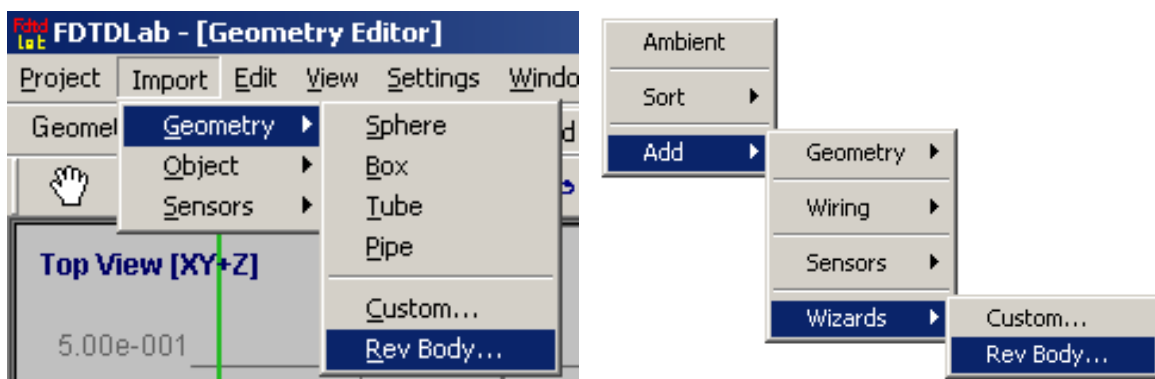
Hot Track – ხაზავს სპლაინის ფორმას Grid Editor-ში (რეკომენდებულია მხოლოდ სწრაფი-კომპიუტერებისთვის).

AutoSpline – თუ მონიშნულია, bi-spline ხელახლა გამოითვლება ყოველ ჯერზე, იცვლება საკონტროლო წერტილის პოზიცია, თუ მონიშნული არ არის, გამოიყენეთ spline დილაკი დიალოგური ფანჯრის მექანიზმში მიმდინარე ბი-სპლაინის ხელახლა გამოსათვლელად.

Spline - ხელახლა გამოთვლის bi-spline (თუ **AutoSpline** თუ OFF).

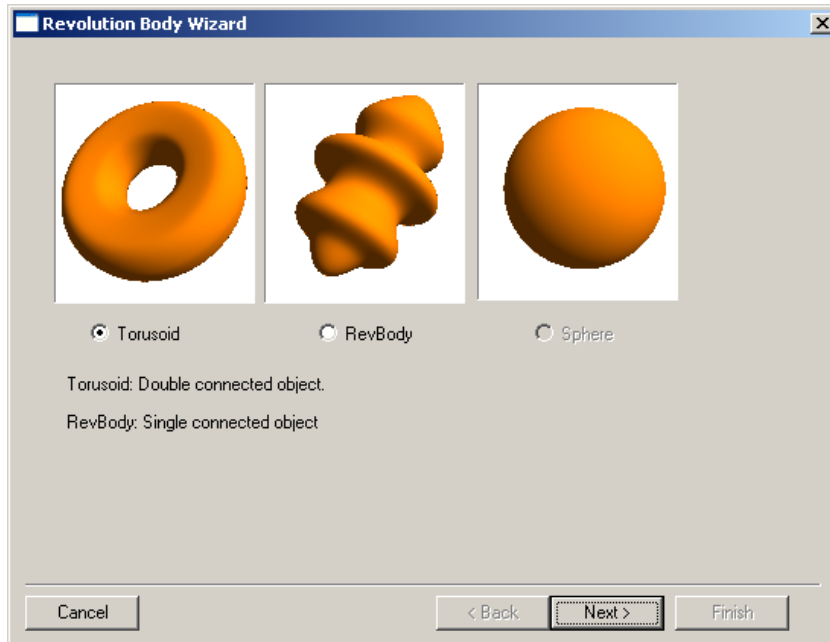
Revolution Bodies

FDTLab-ს აქვს შესაძლებლობა შექმნას რევოლუციის სხეული, მითითებული კვეთის გამოყენებით. არსებობს სხეულების ტიპები: ერთშერტეხული (კონუსის მსგავსი) და ორმაგი შერტეხული (ტორუსის მსგავსი).



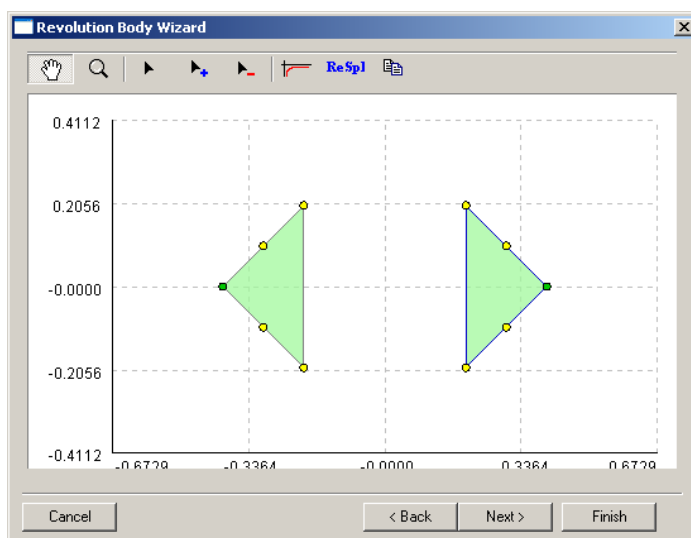
რევოლუციის ორგანო აგებულია "Rev. Body Wizard", რომლის წვდომა შესაძლებელია ან Import->Geometry->Rev Body-დან მთავარ მენიუში, ან Add->Wizards->Rev Body-დან "სხეულები, სენსორების ხე".

STEP 1:



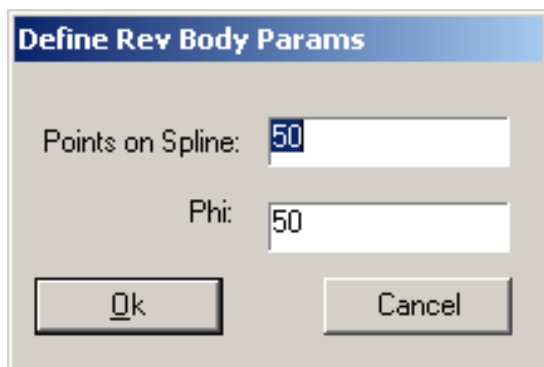
პირველ საფეხურზე მოგეთხოვებათ მიუთითოთ ობიექტის ტიპი: ერთჯერადი ან ორმაგი დაკავშირებული სხეული. აირჩიეთ განკუთვნილი ტიპი და დააჭირეთ შემდეგი-> შემდეგ ეტაპზე გადასასვლელად.

STEP 2:



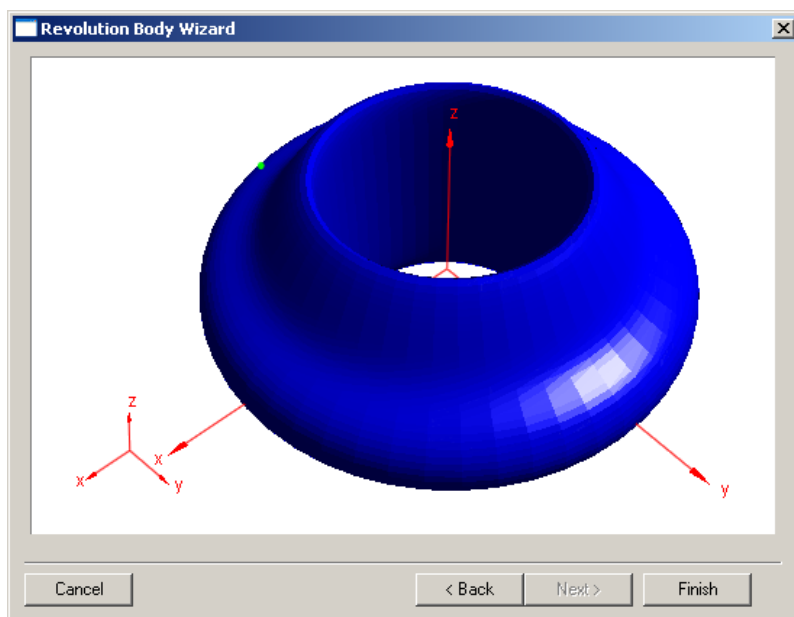
აქ მითითებულია ორგანოს კვეთა:

-  - გადაიტანეთ და გადაიტანეთ მთელი სცენა
-  - გადაიტანეთ და გააღიდეთ სცენა
-  - გადაიტანეთ არჩეული საკონტროლო წერტილი
-  - დაამატეთ საკონტროლო წერტილი
-  - წაშალეთ საკონტროლო წერტილი
-  - რევოლუციური სხეულის პარამეტრები:



-  - ხელახლა გამოთვალეთ ბი-სპლაინი
-  - აკოპირებს მთელ სცენას ბუფერში.

STEP 3:

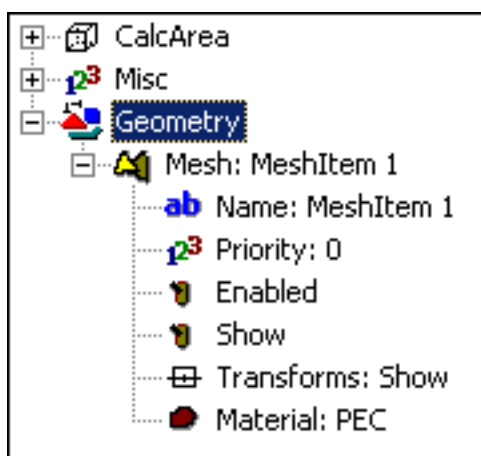


ამ ეტაპზე გენერირებული სხეული ნაჩვენებია 3D სცენაზე. ეს არის ჩვეულებრივი

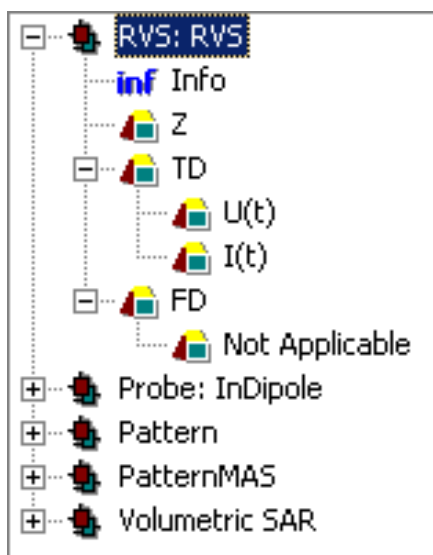
3D-plotter-ის ფანჯარა, ამიტომ შესაძლებელია გამოიყენოთ 3d-plotter-ში არსებული ყველა ფუნქციის გამოყენება.

თუ გენერირებული გეომეტრია არ არის დამაკმაყოფილებელი, ღილაკი "უკან" შეიძლება გამოყენებულ იქნას წინა საფეხურზე დასაბრუნებლად.

ღილაკზე „დასრულება“ დაწკაპუნებით სხეულს მთელ სცენაზე აყენებს და ის ჩანს ბადეში. ამის შემდეგ შესაბამისი ელემენტი ემატება „სხეულები, სენსორების ხეს“:

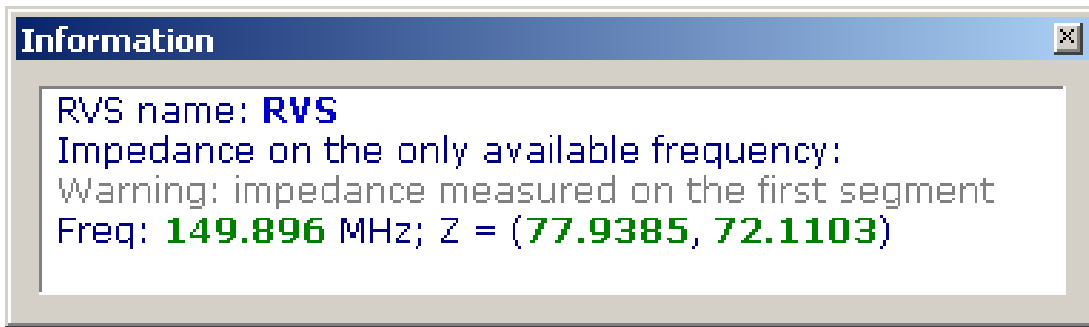


OUTPUT:

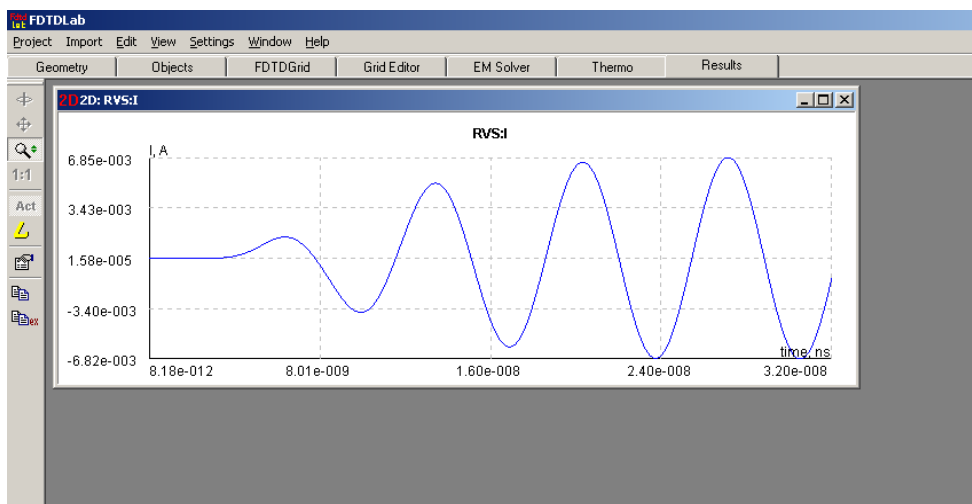


RVS-ის გამომავალი შეიძლება დაათვალიეროთ *Bodies Sensors Tree*-ის სენსორების ჩანართის მეშვეობით. მთლიანი გამომავალი შედეგა:

Z – ორჯერ დააწკაპუნეთ წინაღობის შესახებ ინფორმაციის შედეგების ფანჯარაში სანახავად:



TD/FD – შეიცავს გაზომილ ძაბვას, დენების ნახაზებს დროის დომენისთვის (სინუსოიდური აგზნება)/სიხშირის დომენის (ნულოვანი აგზნების) გამოთვლებისთვის. სიხშირის დომენის გამოთვლების შემთხვევაში, გამომავალი თითოეული ინტერესის სიხშირისთვის ხელმისაწვდომია. კვებების სანახავად ორჯერ დააწკაპუნეთ შესაბამის პუნქტზე. 2D კვეთა გაიხსნება შედეგების ფანჯარაში:

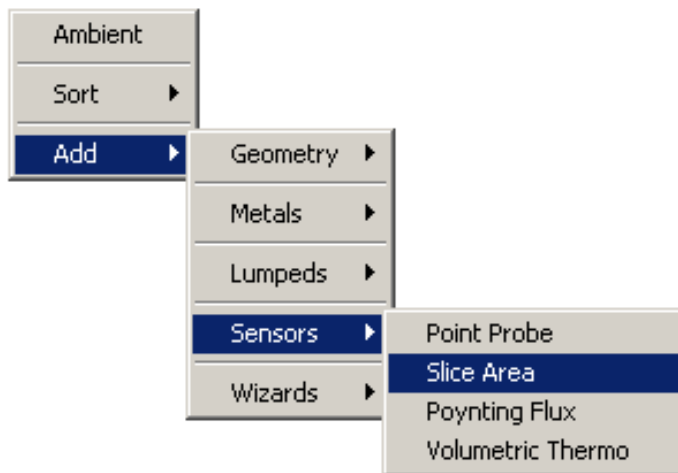


Area Sensor

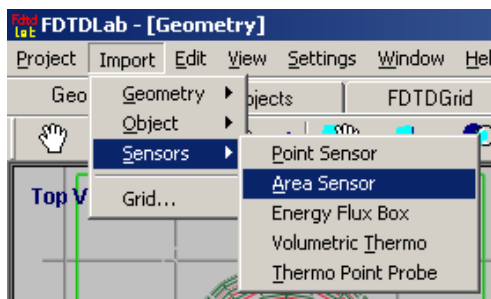
არეა სენსორები გამოიყენება E , H ველის მნიშვნელობების, SAR და სიმძლავრის სიმკვრივის გამოსათვლელად და შესანახად ქსელში განსაზღვრული ნაწილის ზედაპირზე.

მას ემატება:

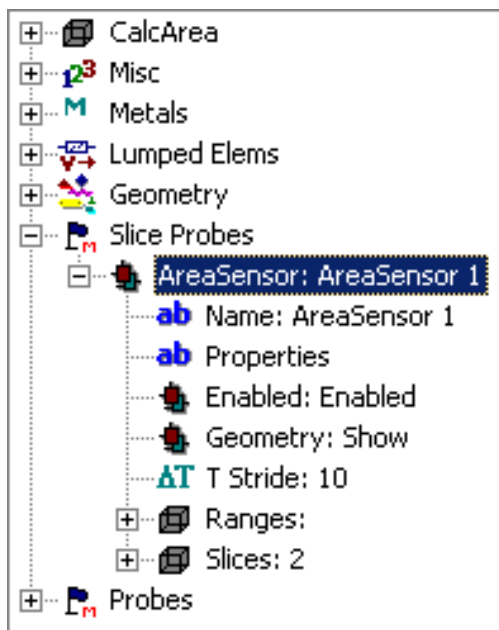
"სხეულები, სენსორების ზიდან" (დააწკაპუნეთ მაუსის მარჯვენა ღილაკით ზონაში):



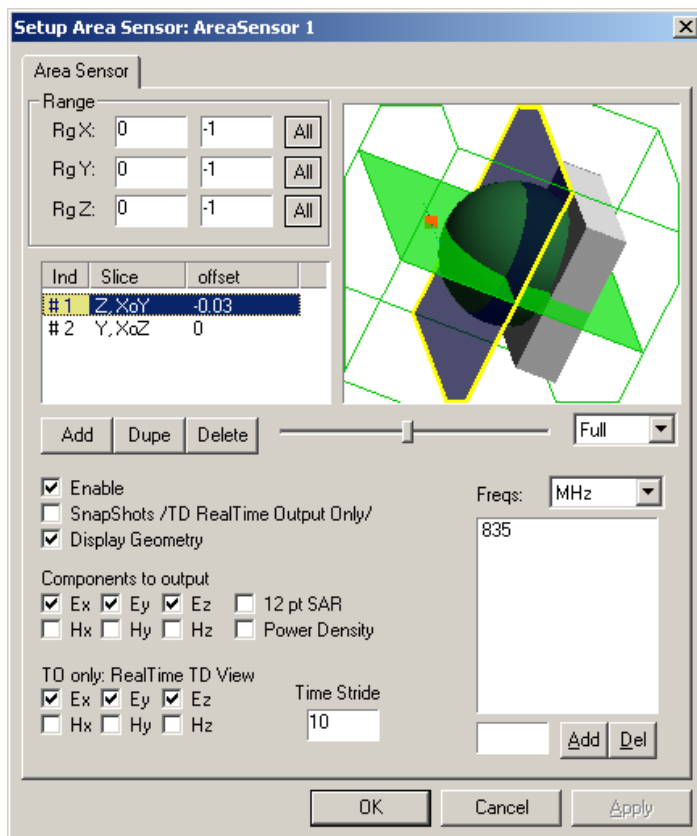
ან მთავარი მენიუდან:



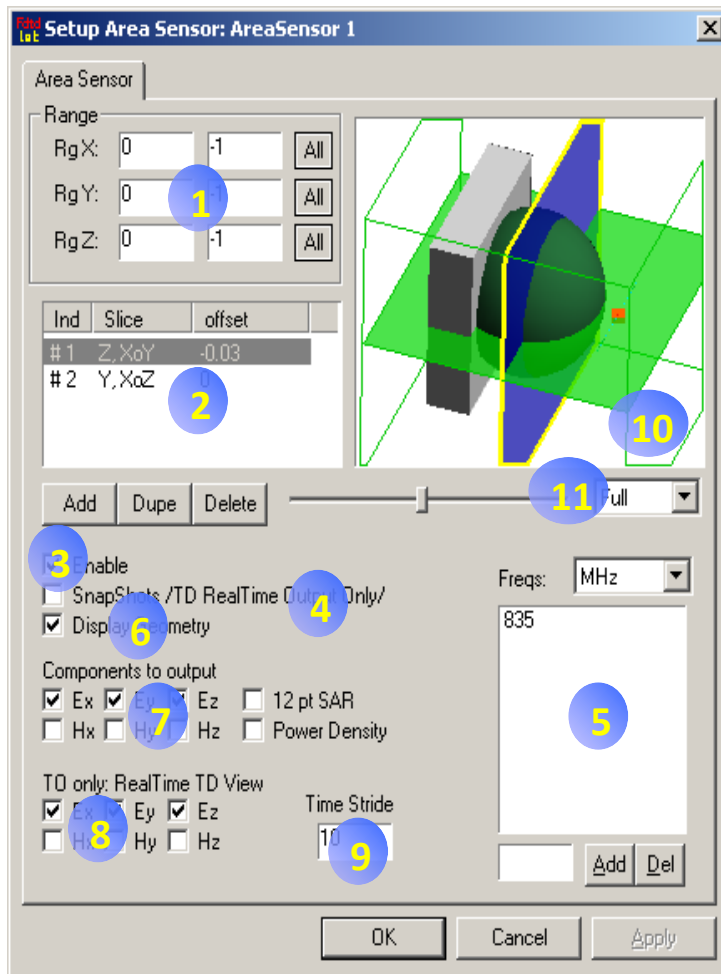
სენსორის დამატების შემდეგ, მისი თვისებების ნახვა/მოდიფიცირება შესაძლებელია „სხეულები, სენსორების ზიდან“:



PROPERTIES DIALOG:

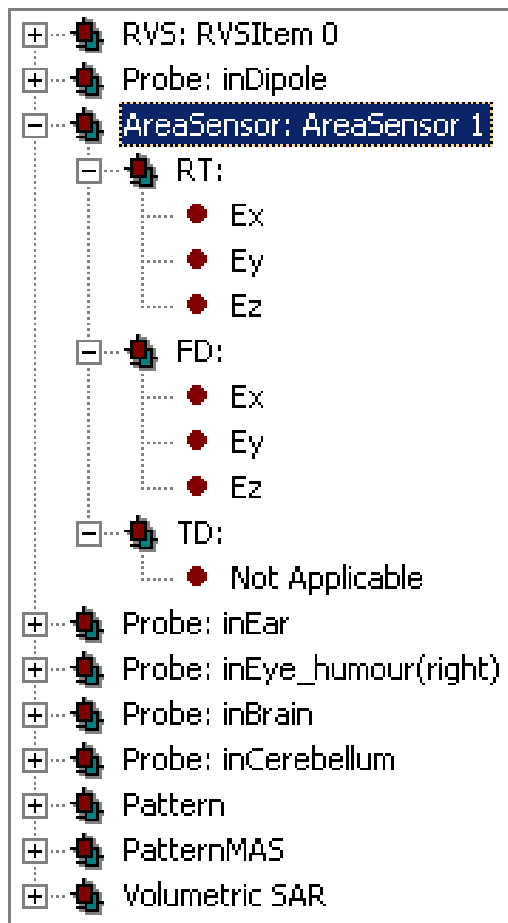


მასზე წვდომა ხდება "თვისებები"- პუნქტზე ორჯერ დაწკაპუნებით "სხეულები, სენსორების ხე".



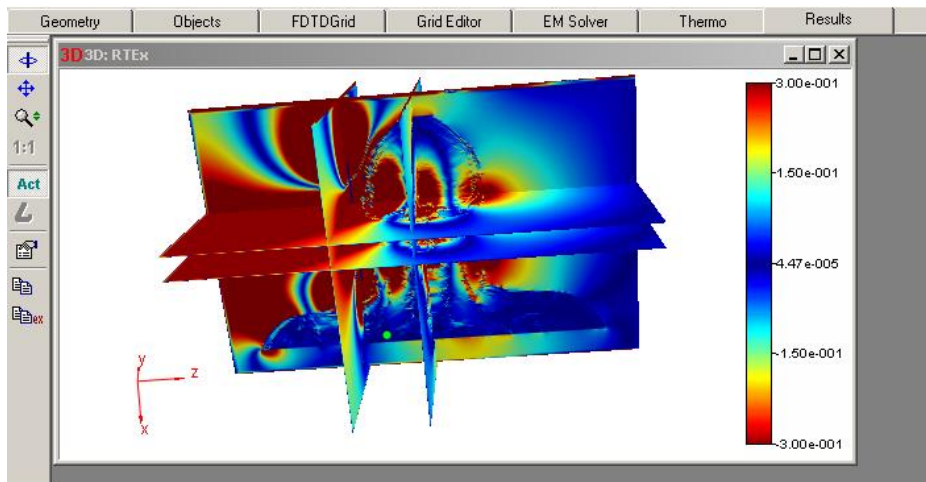
- 1 - აწესებს შემოსაზღვრულ ყუთს/Box ყველა სიბრტყისთვის
- 2 - წინამდებარე სიბრტყეების სია: slice – ორიენტაცია, offset – კოორდინატი
- 3 - ჩართვა/გამორთვა - აქტიურია თუ არა სენსორი FDTD-ის შემდეგ გაანგარიშებაში?
- 4 - შეინახეთ/არ შეინახოთ რეალურ დროში კადრები
- 5 - ინტერესის სიხშირეების სია
- 6 - აჩვენეთ სიბრტყეები (ვთქვათ ბადის რედაქტორში)
- 7 - მონაცემები, რომლებიც შეინიშნება
- 8 - დაკვირვების დროის მონაცემები
- 9 - დრო ორ რეალურ დროს შორის
- 10 - მინი სცენა ამჟამად აქტიური სიბრტყეებით და, ალბათ, სხვა ობიექტებით
- 11 - სლაიდერი - ცვლის სიბრტყის მდებარეობას (ოფსეტური). გამოიყენეთ კომბინირებული ყუთი მინი სცენაზე დახატული ობიექტების ასარჩევად.

OUTPUT:



არეა სენსორის გამომავალი შეიძლება დაათვალიეროთ სხეულების სენსორების ჩანართის მეშვეობით, სენსორების ხე. თითოეული სენსორისთვის (შესაბამისი ხის ელემენტი შეიცავს სახელს), მთლიანი გამომავალი შედეგები:

RT - რეალურ დროში გაზომილი მონაცემები. ამოხსნის პროცესში, თითოეული გაზომილი სიდიდე შეიძლება ნახოთ შედეგების ფანჯარაში. ერთადერთი რაც საჭიროა – არის ორჯერ დააწკაპუნოთ შესაბამის პუნქტზე:



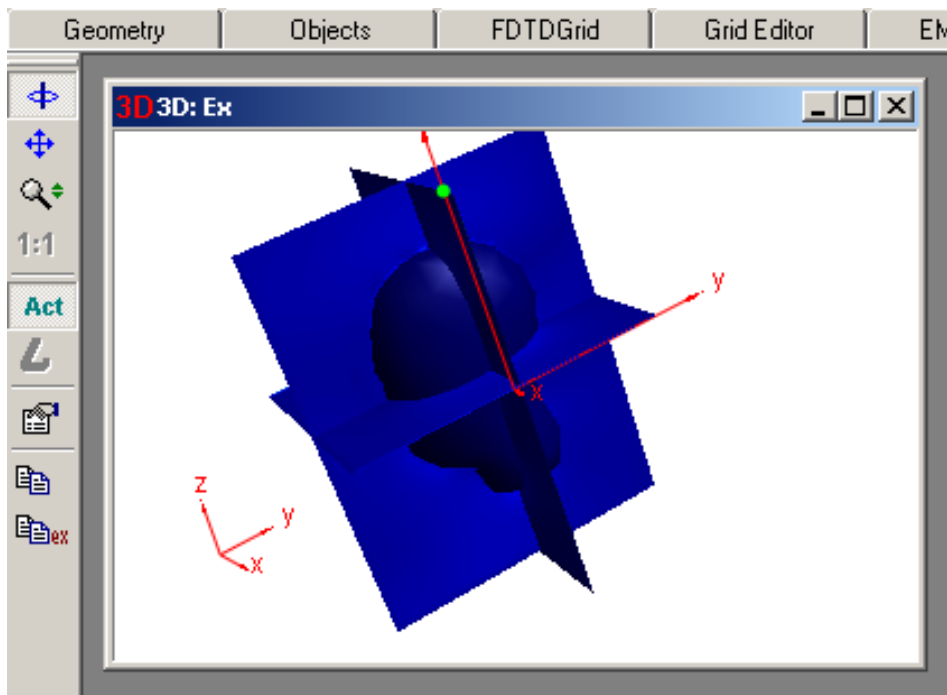
FD/TD – შეიცავს ზომების მონაცემებს:

აგზნების სიხშირე (სინუსოიდური აგზნება, დროის დომენი)

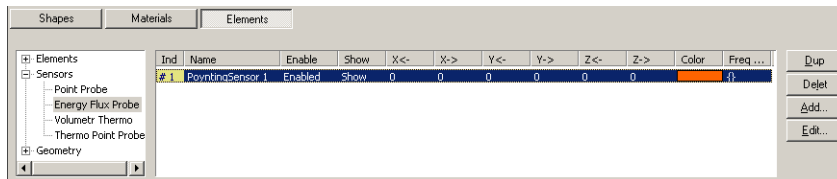
თითოეული საინტერესო სიხშირე (ნულოვანი ალგზნება, სიხშირის დომენი)

ორჯერ დააწკაპუნეთ ერთზე სასურველ ელემენტზე, შედეგების ფანჯარაში იხსნება

შესაბამისი 3D კვეთა (კვეთის მონაცემებით):

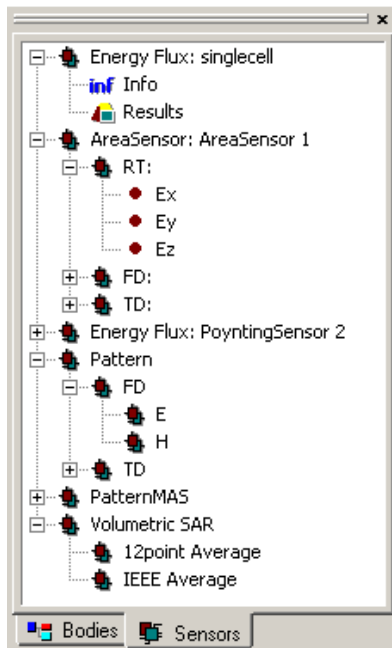


Objects->Sensors->Poynting flux window:



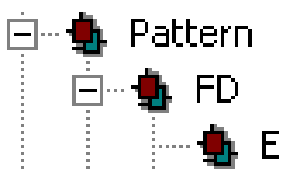
Sensors

საშუალო პროექტში საერთო სენსორების ჩანართი ასე გამოიყურება:

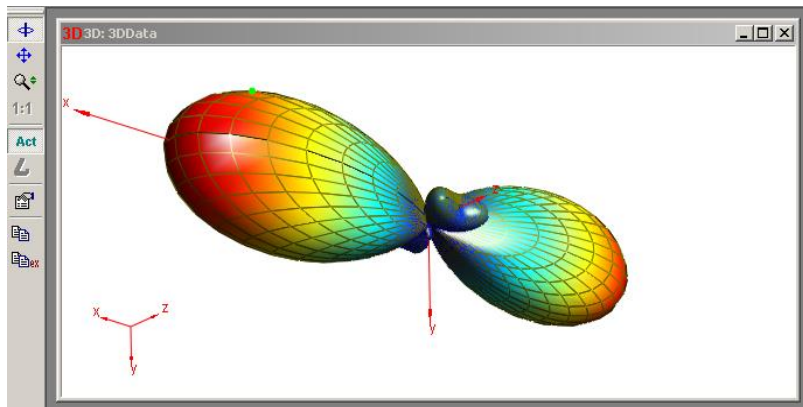


სენსორების ჩანართი შედგება ყველა სენსორის სიისგან, რომლებიც აქტიური იყო FDTDLab გამოთვლების დროს. აქ შეგიძლიათ დაათვალიეროთ გამომავალი მონაცემები და აირჩიოთ სანახავად საჭირო ელემენტი. ორჯერ დააწკაპუნეთ ნებისმიერ მონაცემზე, ხსნის შესაბამის ფანჯარას "შედეგები" ფანჯარაში.

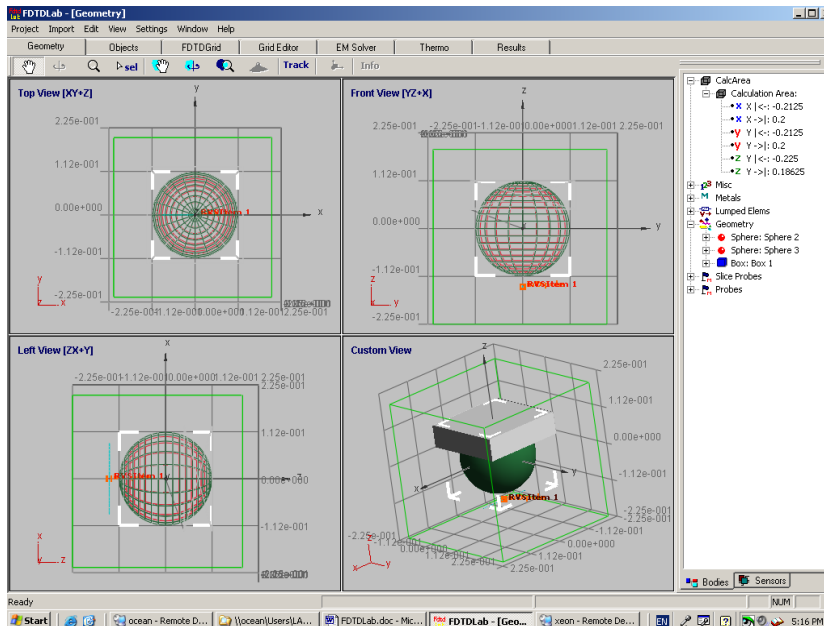
მაგალითად, შორეული ველის E ნიმუშის სანახავად, ორჯერ დააწკაპუნეთ Pattern->FD->E element:



დიაგრამა გაიხსნება შედეგების ფანჯარაში:



GEOMETRY EDITOR

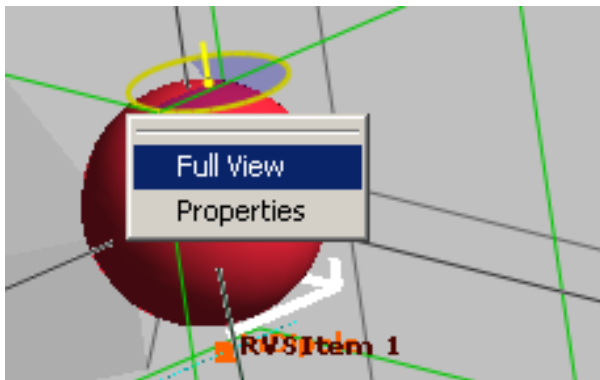


Geometry Editor აჩვენებს და უზრუნველყოფს ეფექტურ გზებს სცენაზე არსებული გეომეტრიული ობიექტების რედაქტირებისთვის.

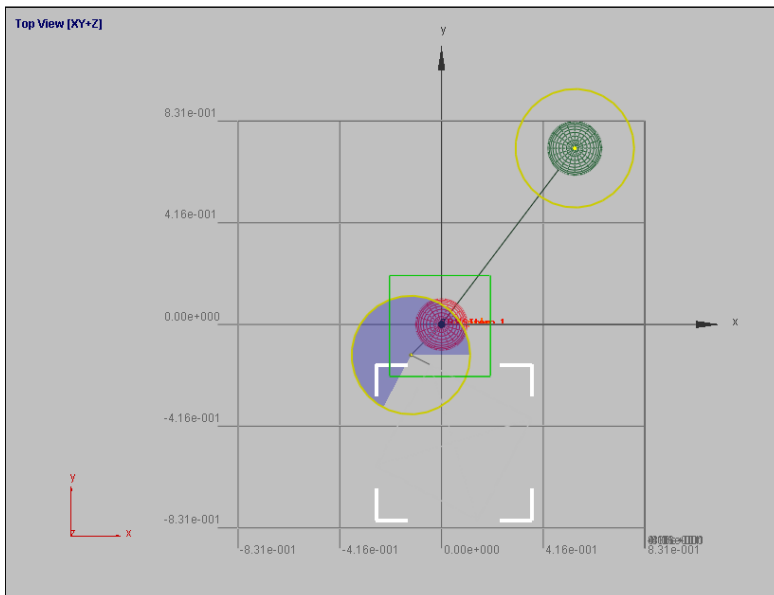
გეომეტრიის რედაქტორში ნაგულისხმევად არის 4 ნახვა:

- 3D,
- მარცხენა,
- წინა და ზედა.

4 - ხედიდან ერთზე მარჯვენა ღილაკით დაწკაპუნება ხსნის კონტექსტს მენიუდან:



Full View – აფართოებს დაწკაპუნებულ ხედვის ფანჯარას მთელ სცენაზე, ასე:



აქ, მაუსის მარჯვენა ღილაკზე დაჭერით, გამოჩნდება შემდეგი კონტექსტური მენიუ:



Restore Views – აღადგენს 4 ხედვის ფანჯარას

ორივე შემთხვევაში, კონტექსტურ მენიუში თვისებების დაწკაპუნებით იხსნება დიალოგური ფანჯარა, სადაც შესაძლებელია ვიზუალიზებული სცენის თვისებების

რედაქტირება:

perspective – დააწკაპუნეთ პერსპექტივის პროექციის გასააქტიურებლად.

წინააღმდეგ შემთხვევაში გამოიყენება ორთოგრაფიული პროექცია

back color – ფონის ფერი

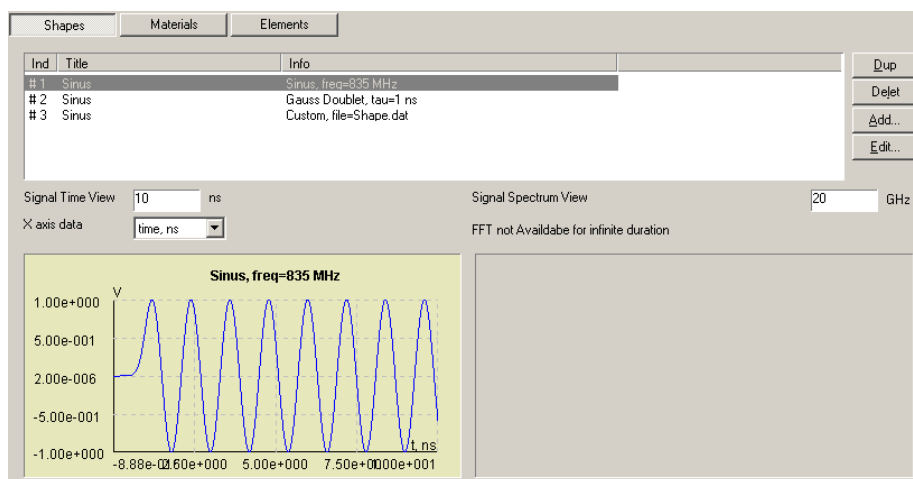
smooth shading – ირჩევს გლუვი ჩრდილის მოდელს - ჩართვა აუმჯობესებს ხარისხს, ხოლო გამორთვა იწვევს უფრო მაღალ ხარისხს.

fog – იყენებს ნისლის ეფექტებს სცენაზე - კამერიდან შორს ობიექტები ბუნდოვანია.

OBJECT EDITOR

ობიექტის რედაქტორი, როგორც "სხეულების" ხის ალტერნატივა, შეიძლება გამოყენებულ იქნას გეომეტრიის ობიექტების, ელემენტების, მავთულის, სენსორების დასამატებლად/რედაქტირებაში/წაშლაში. ასევე ის უზრუნველყოფს წვდომას აგზნების ტალღის ფორმებზე, რაც საშუალებას აძლევს შექმნას/შეცვალოს სხვადასხვა სახის აგზნები.

Shapes



Shapes ფანჯარა უზრუნველყოფს კომფორტულ ინტერფეისს პრობლემისთვის აგზნების ტიპების დასამატებლად/შესაცვლელად. თითქმის ყველა ამოცანაში არსებობს ისეთი ელემენტები, რომლებიც ასხივებენ **EM** ტალღებს (მაგალითად, **RVS**). ზოგჯერ ადამიანი იყენებს უბრალო ტალღას, დაცემულს ინტერესის სტრუქტურაზე, როგორც აგზნება. აგზნების სახეობა მოცემულია ტალღის ფორმით.

Shapes ფანჯარა შედგება ორი ძირითადი ნაწილისგან:

wave shape edit part

wave shape view part

wave shape edit part

Ind	Title	Info	
#1	Sinus	Sinus, freq=835 MHz	Dup
#2	Sinus	Gauss Doublet, tau=1 ns	Delet
#3	Sinus	Custom, file=Shape.dat	Add...
			Edit...

მარცხნივ არის არსებული ტალღის ფორმების სია.

სიის არეში მაუსის მარჯვენა ღილაკზე დაწკაპუნებით, იხსნება კონტექსტური მენიუ, რომელიც უზრუნველყოფს იგივე ფუნქციონირებას, როგორც შემდეგი ღილაკებიდან:

dup – ასახავს არჩეულ ტალღის ფორმას

delet – წაშლის არჩეულ ტალღის ფორმას სიიდან

add... - ამატებს ახალი ტალღის ფორმას:

Materials

მასალების/ნივთიერების ფანჯარა უზრუნველყოფს წვდომას ყველა მასალაზე, რომელიც შეიძლება გამოყენებულ იქნას FDTD ამოხსნის პროცესში.

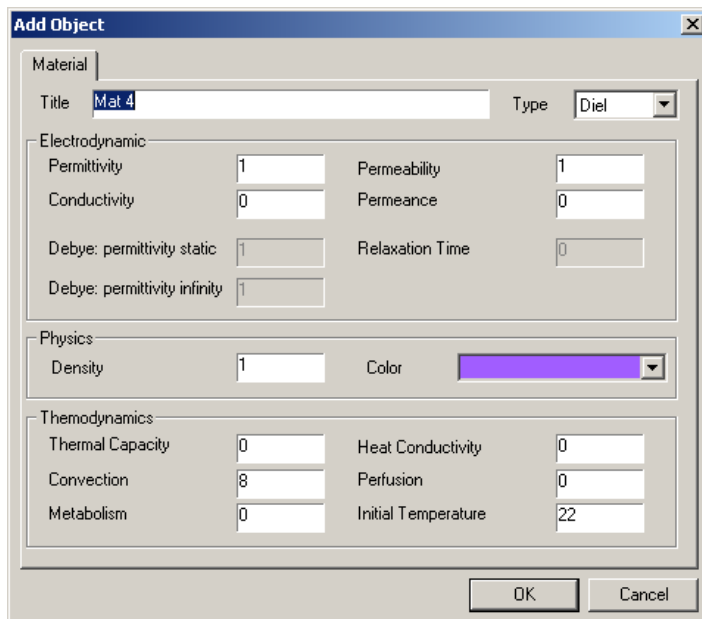
Ind	Title	Type	Eps	Miu	Sig	nSig	Po	e_s	e_inf	t_relax	capac	conduct	convect	b_perfus	metabol	t_init	Color
#1	Vacuum	diel	1	1	0	0	1	1	1	0	0	0	8	0	0	22	
#2	PEC	PEC	3	4	0	0	2	1	1	0	0	0	8	0	0	22	
#3	sphera2	diel	20	1	0.5	0	1	1	1	0	0	0	8	0	0	22	
#4	sphera1	diel	10	1	0.5	0	1	1	1	0	0	0	8	0	0	22	

სიაში მაუსის მარჯვენა ღილაკზე დაწკაპუნებით, გაიხსნება კონტექსტური მენიუ, ფუნქციით, ერთ-ერთ ღილაკთან ახლოს:

Dup – ახდენს შერჩეული მასალის დუბლირებას

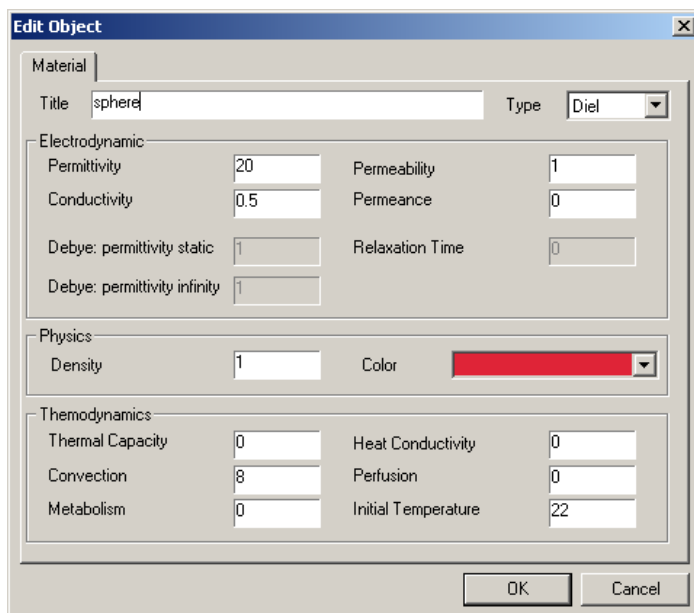
Delete – შლის არჩეულ მასალას

Add... – ამატებს ახალ მასალას::



The 'Add Object' dialog box is used to create a new material. It features a 'Material' tab with a 'Title' field containing 'Mat 4' and a 'Type' dropdown set to 'Diel'. The 'Electrodynamic' section includes input fields for Permittivity (1), Conductivity (0), Permeability (1), Permeance (0), Debye: permittivity static (1), and Debye: permittivity infinity (1). The 'Physics' section has a Density field (1) and a Color dropdown (purple). The 'Thermodynamics' section includes Thermal Capacity (0), Convection (8), Metabolism (0), Heat Conductivity (0), Perfusion (0), and Initial Temperature (22). 'OK' and 'Cancel' buttons are at the bottom.

მასალის/ნივთიერების პარამეტრების რედაქტირება შესაძლებელია პირდაპირ სიიდან (ორჯერ დააწკაპუნეთ შესაბამის ველზე და შეიყვანეთ სასურველი ნომერი) ან რედაქტირების ობიექტის დიალოგური ფანჯრიდან:



The 'Edit Object' dialog box is used to modify an existing material. It features a 'Material' tab with a 'Title' field containing 'sphere' and a 'Type' dropdown set to 'Diel'. The 'Electrodynamic' section includes input fields for Permittivity (20), Conductivity (0.5), Permeability (1), Permeance (0), Debye: permittivity static (1), and Debye: permittivity infinity (1). The 'Physics' section has a Density field (1) and a Color dropdown (red). The 'Thermodynamics' section includes Thermal Capacity (0), Convection (8), Metabolism (0), Heat Conductivity (0), Perfusion (0), and Initial Temperature (22). 'OK' and 'Cancel' buttons are at the bottom.

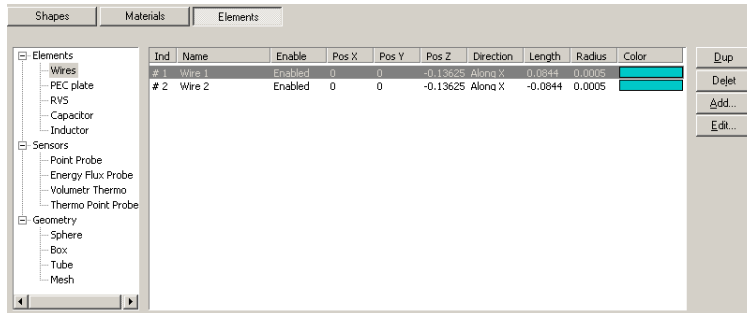
title – მასალის დასახელება

Type – დიელექტრიკი, იდეალური ელექტროგამტარი, დეზაი მედია.

დანარჩენი არის ჩვეულებრივი ელექტროდინამიკური, ფიზიკური და თერმოდინამიკური პარამეტრები **SI** სისტემაში.

Elements

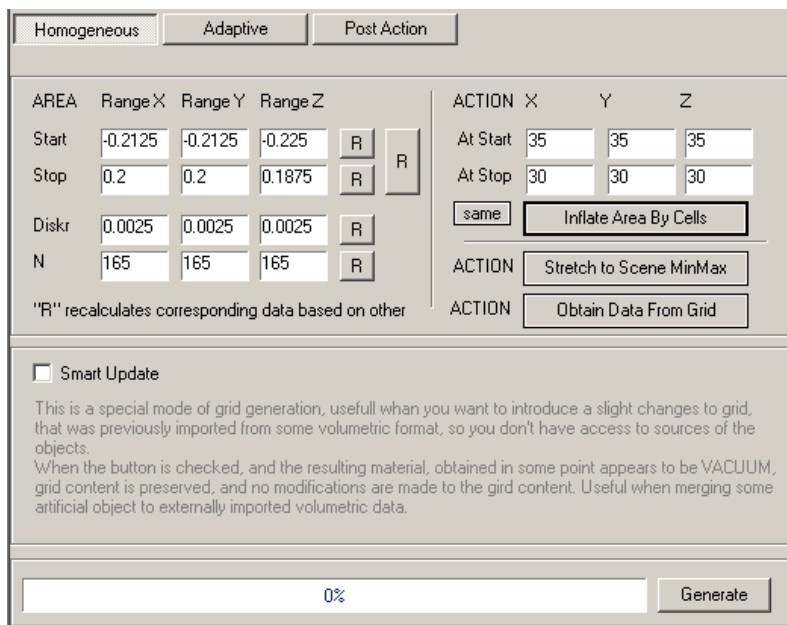
ელემენტების ფანჯარა შეიცავს სცენაზე არსებული ელემენტების, სენსორების და გეომეტრიის ჩამონათვალს.



GRID GENERATOR

ბაღე FDTDLab-ში წარმოადგენს მართკუთხა სივრცის მესერს. Grid Generator გამოიყენება შესაბამისი ბადის შესაქმნელად, გარკვეული პარამეტრების საფუძველზე.

Homogeneous

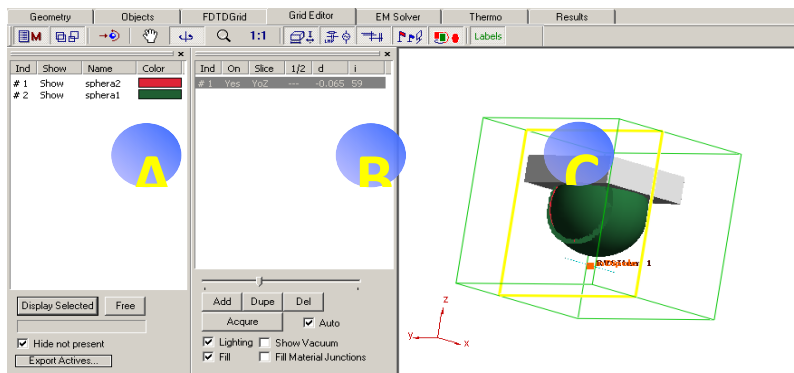


ბადის ყველაზე მარტივი სახეობა არის ერთგვაროვანი მართკუთხა მესერი. ჰომოგენური/ერთგვაროვანი ბადის შექმნა ხორციელდება FDTD Grid-> Homogeneous window-ის ინტერფეისის მეშვეობით.

Smart Update – ეს არის ბადის წარმოქმნის სპეციალური რეჟიმი, რომელიც გამოსადეგია, როდესაც საჭიროა ბადეში მცირე ცვლილებების შეტანა, რომელიც ადრე იყო შემოტანილი რაიმე მოცულობითი ფორმატიდან, ობიექტების წყაროებზე წვდომის აუცილებლობის გარეშე. როდესაც მონიშნული ველი მონიშნულია და რაღაც მომენტში მიღებული მასალა ვაკუუმად გამოიყურება, ბადის შინაარსი შენარჩუნებულია და ბადის შინაარსში ცვლილებები არ განხორციელდება. ის სასარგებლოა ხელოვნური ობიექტის გარედან იმპორტირებულ მოცულობით მონაცემებთან შერწყმისას.

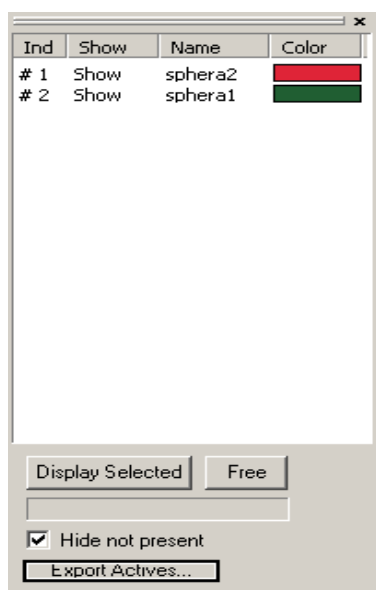
Generate – განსაზღვრულ პარამეტრებზე დაყრდნობით ქმნის ბადეს. შეხედეთ პროგრესის ზოლს პროგრესისთვის.

GRID EDITOR



Grid Editor გაძლევთ შესაძლებლობას შეამოწმოთ FDTD- ამომხსნელზე გადაცემული ბადის საბოლოო მდგომარეობა. Grid Editor-ში მონაცემები განახლდება ყოველ ჯერზე, როდესაც მომხმარებელი დააწკაპუნებს ღილაკზე „გენერაცია“ „Grid Generator“-ში. Grid Editor შედგება სამი სფეროსგან A, B & C (ნახ.).

A



– მასალების სელექტორი/შემრჩევი, აკონტროლებს მასალებს. იგი გამოიყენება იმის დასადგენად, თუ რომელი მასალები (ბადეში არსებულიდან) უნდა იყოს ნაჩვენები ამჟამად და რა ფერით. "A" -არეში მაუსის მარჯვენა ღილაკზე დაჭერით გამოჩნდება მენიუ, საიდანაც შეგიძლიათ მასალების დამატება/რედაქტირება/დუბლირება/წაშლა.

B



– **Slice Selector:** შეგიძლიათ მიუთითოთ ნებისმიერი რაოდენობის სიბრტყე, რომლებშიც უნდა დააკვირდეთ ბადეს. მხოლოდ სიბრტყის სანახავად დააწკაპუნეთ ცარიელ ზონაში. სიბრტყის დამატების შემდეგ (მაუსის მარჯვენა ღილაკი-

დააწკაპუნეთ->დამატება) დააკონფიგურიროთ სასურველი პოზიცია და ორიენტაცია.

slider ცვლის d-ის მნიშვნელობას.

სიბრტყის დახატვა შესაძლებელია შევსებული და მავთულის ჩარჩოს რეჟიმში (გადამრთველი **Fill**), განათებით ან მის გარეშე, შევსებით ან არამატერიალური კვანძებით. ვაკუუმი აშკარად შეიძლება გამოირჩეოდეს სიბრტყეში. თუ ჩართულია ავტომატური ველი, როდესაც სიაში რაღაც იცვლება, სცენა C ავტომატურად განახლდება. თუ ავტომატური არ არის მონიშნული, დააჭირეთ **Aquire** ღილაკს ცვლილებების გასაგზავნად.

C

– არის თავად სცენის ფანჯარა, სადაც ნაჩვენებია ბადე სიბრტყეებით. ინსტრუმენტთა პანელზე ღილაკები აკონტროლებენ:

Computational Bounds

Lumped Elements

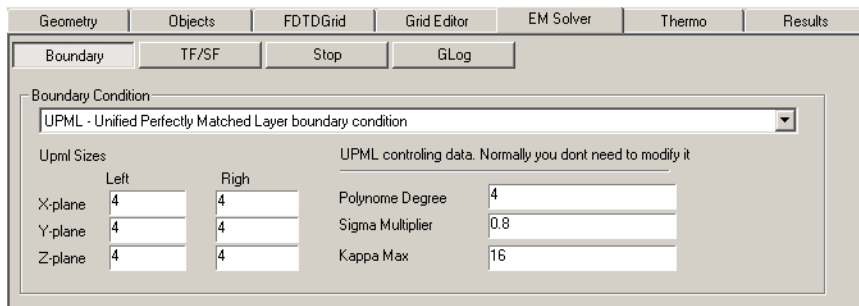
Wiring

Sensors

Geometry

SOLVER PROPERTIES

Boundary Conditions



რეალური პროცესები ხორციელდება უსასრულო სივრცის დომენში, ხოლო FDTD სიმულაციის დროს ეს დომენი იზღუდება ბადის ზომით. ამ ფენომენის სწორად გატარების მიზნით, გამოიყენება სასაზღვრო პირობები.

FDTDLab მხარს უჭერს შემდეგი ტიპის სასაზღვრო პირობების:

PEC – იდეალური ელექტრული გამტარის სასაზღვრო მდგომარეობა

PML – იდეალური მაგნიტური გამტარის სასაზღვრო მდგომარეობა

MUR II – მურის მეორე რიგის სასაზღვრო მდგომარეობა

UPML – ერთიანი იდეალურად შესაბამისი ფენის სასაზღვრო მდგომარეობა

The image shows a software dialog box titled "Boundary Condition". It has a dropdown menu set to "UPML - Unified Perfectly Matched Layer boundary condition". Below this, there are two main sections. The first is "Upl Sizes" with a table for Left and Right sides, each with input fields for X-plane, Y-plane, and Z-plane, all containing the value 4. The second section is "UPML controlling data. Normally you dont need to modify it", which contains input fields for "Polynome Degree" (4), "Sigma Multiplier" (0.8), and "Kappa Max" (16).

UPML Sizes - ადგენს UPML რეგიონის ოფსეტებს საანგარიშო დომენის შიგნით.

Stop Conditions

The image shows a software dialog box titled "Stop Conditions". It has tabs for "Boundary", "TF/SF", "Stop", and "GLog", with "Stop" currently selected. The "Calculation Stop Criteria" section has a checked "Enabled" box. It includes input fields for "Relative Stability, %" (1), "Relative Stability, dB" (-40), and "Limit Max Number of steps" (4000). A text box explains the criteria: "The calculation stop criteria uses 7 points by default - one in the center, and 6 around the calculation area, offset with the 0.15 of calculational area size from the boundary condition area. If necessary, one can specify additional points in the listbox. Calculation stops when: 1. Sinus: Relative difference between the latest energy density values in cells maximums becomes less than Relative Limit. 2. Zero-ended pulse: When Energy density value in control cells becomes less than relative limit". Below this is an "Additional Points" section with "Add", "Dupe", and "DEL" buttons. A table lists points with columns: Ind, Name, On, Pos X, Pos Y, Pos Z, and Color. The first row shows "# 1 AuxVertex 1" with "On" checked, and coordinates (0, 0, 0), with a green color box.

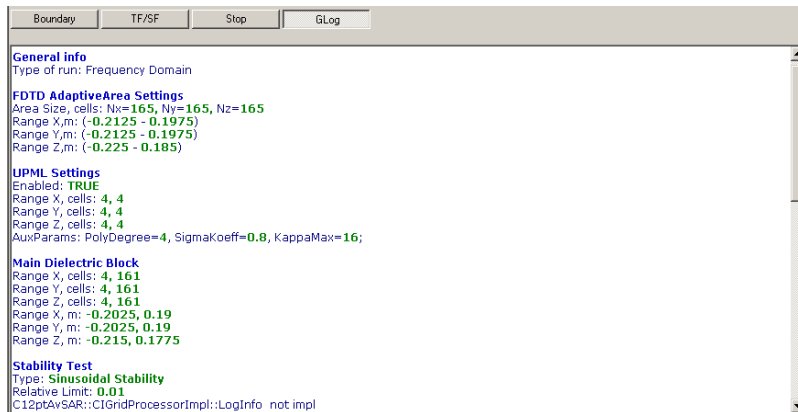
თვლის გაჩერება კონტროლდება ე.წ. სტაბილურობის კრიტერიუმებით. ის ნაგულისხმევად იყენებს 7 ქულას - ერთს ცენტრში და 6-ს საანგარიშო არეალის გარშემო, ოფსეტური საანგარიშო ფართობის ზომით 0,15 სასაზღვრო მდგომარეობის ფართობიდან. სიის ველში შესაძლებელია სხვა ქულების დამატება. გამოთვლა ჩერდება, როდესაც:

ა) სინუს აგზნება: მაქსიმალური ფარდობითი სხვაობა ენერგიის სიმკვრივის ორ უახლეს მნიშვნელობას შორის საკონტროლო უჯრედებში ხდება ფარდობით ზღვარზე ნაკლები.

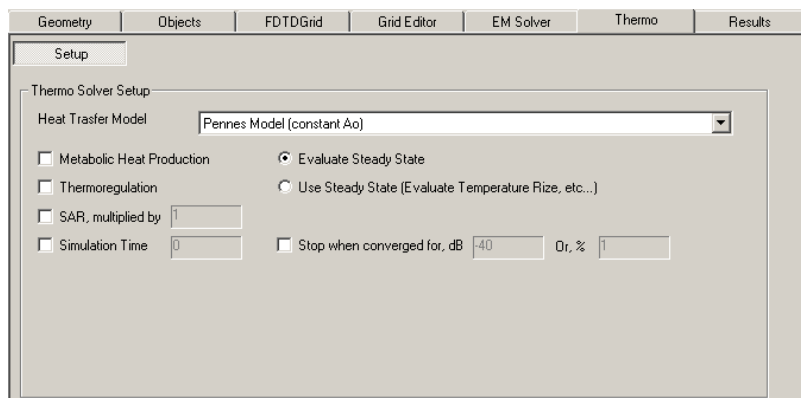
ბ) ნულოვანი იმპულსი: ენერგიის სიმკვრივის მნიშვნელობა საკონტროლო უჯრედებში ხდება ფარდობით ზღვარზე ნაკლები.

Log

FDTDLab-ის თითოეული კომპონენტი აგზავნის თავის სტატუსის ინფორმაციას **log** ფანჯარაში, როდესაც გაანგარიშება იწყება. მისი გამოყენება შესაძლებელია გადაწყვეტის პროცესის გარშემო არსებული ყველა მონაცემის შესამოწმებლად.



Thermo



თერმო ამომხსნელი აფასებს ტემპერატურისა და სითბოს ნაკადის განაწილებას საანგარიშო არეალში გამომსხივებელი და შთამნთქმელი სხეულების შესახებ ინფორმაციის საფუძველზე.

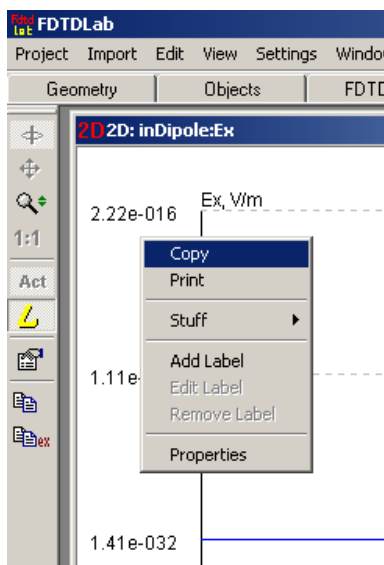
Results

ამა თუ იმ სენსორის მიერ დაგროვებულ მონაცემებზე დაკვირვებისას, **SAR** განაწილების დათვალიერებისას, შორი ველის დიაგრამის შემოწმებისას და ა.შ. უმეტეს შემთხვევაში "შედეგების" ფანჯრის ქვეფანჯარაშია.

შედგების ლოკალური მენიუ არის:



მაუსის მარჯვენა ღილაკზე დაწკაპუნების შემდეგ 2D კვეთის ხედში გამოჩნდება შემდეგი მენიუ:



ახალი სიმბოლოზე დაწკაპუნებით და გადართევით იცვლება მისი პოზიცია. სიმბოლოზე ორჯერ დაწკაპუნებით გადადის „ლეიბლის“ რედაქტირების რეჟიმში, სადაც შეგიძლიათ შეიყვანოთ ნებისმიერი ტექსტი „ლეიბლში“. ასევე, შესაძლებელია სიმბოლოს რედაქტირება/წაშლა კონტექსტური მენიუდან.

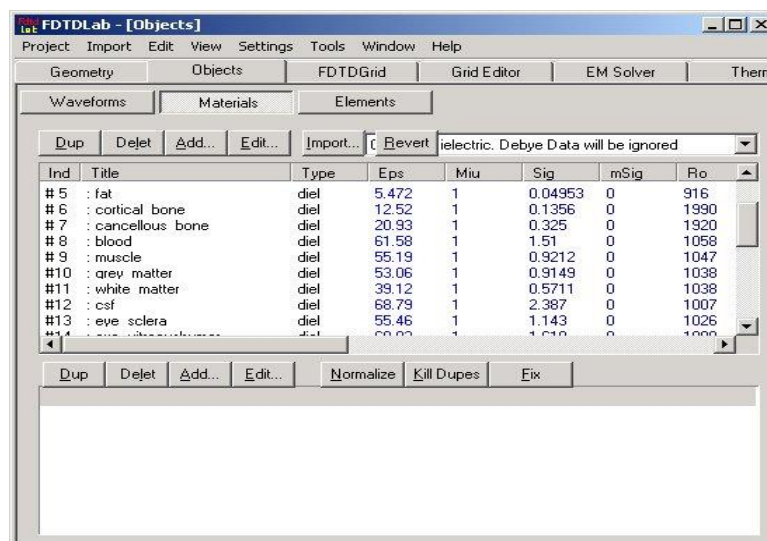
3. 2. ელექტრომაგნიტური და თერმული ამომხსნელი

მას შემდეგ რაც მომხმარებელი შექმნის ამოცანის გეომეტრიულ მოდელს, დასათვლელი ბადის გენერირებამდე, საჭიროა ამ ობიექტებისთვის შესაბამისი ემ და თერმული თვისებების მქონე ნივთიერებების "მინიჭება". პროგრამაში გათვალისწინებულია ნივთიერებათა ბაზა (სურ. 3.2.1), სადაც მომხმარებელს შეუძლია დაამატოს ნივთიერებები და მათი ფიზიკური პარამეტრები.

პროგრამაში ასევე გათვალისწინებულია აღზნების წყაროები. კერძოდ:

1. წინაღობა ბოლოებზე მოდებული ძაბვით;
2. ვიწრო ღრეჩო ბოლოებზე მოდებული ძაბვით;
3. ბრტყელი ტალღა, მოცემული პოლარიზაციის ვექტორით და მიმართულებით.

თითოეულ ამ წყაროს შეიძლება მიეცეს სხვადასხვა ფორმის აღზნება: გაუსი, სინუსოიდალური, მოდულირებული – გარკვეულ მინიმალურ და მაქსიმალურ სიხშირეებს შორის ან სხვა – მომხმარებლის მიერ განსაზღვრული, რომელიც გარე ფაილიდან მიეწოდება (სურ. 3.2.2).



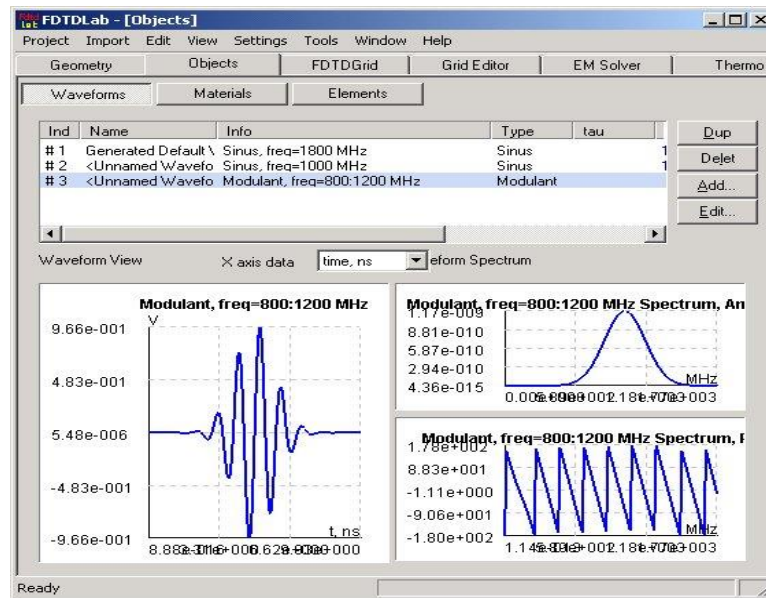
The screenshot shows the 'FDTDLab - [Objects]' window with the 'Materials' tab selected. It displays a table of material properties with columns: Ind, Title, Type, Eps, Miu, Sig, mSig, and Ro. The table lists various biological materials with their corresponding dielectric and magnetic properties.

Ind	Title	Type	Eps	Miu	Sig	mSig	Ro
# 5	: fat	diel	5.472	1	0.04953	0	916
# 6	: cortical bone	diel	12.52	1	0.1356	0	1990
# 7	: cancellous bone	diel	20.93	1	0.325	0	1920
# 8	: blood	diel	61.58	1	1.51	0	1058
# 9	: muscle	diel	55.19	1	0.9212	0	1047
#10	: grey matter	diel	53.06	1	0.9149	0	1038
#11	: white matter	diel	39.12	1	0.5711	0	1038
#12	: csf	diel	68.79	1	2.387	0	1007
#13	: eye sclera	diel	55.46	1	1.143	0	1026
#14	: eye vitreous humor	diel	80.00	1	1.000	0	1000

სურათი 3.2.1. ნივთიერებათა ბაზა

ვინაიდან FDTD მეთოდში აღზნების გავრცელება ხდება ბადის ერთი წერტილიდან მეორეში, აუცილებელია დასათვლელი არის საზღვრებზე გარკვეული პირობის დადება ან უსასრულო სივრცის იმიტაცია. ამისათვის გამოყენებულია შემდეგი პირობები:

1. PEC _ იდეალურად ელექტროგამტარი;
2. PMC _ იდეალური მაგნეტოგამტარი;
3. მურის II ტიპის სასაზღვრო პირობა (უსასრულო სივრცის იმიტაცია);
4. UPML _ არაექსიალური იდეალურად შეთანხმებული ფენების პირობა.



სურათი 3.2.2. ალგზნების ფორმები

დათვლის შესაწყვეტად, ბადის საკონტროლო წერტილებში მოწმდება პროცესის ჰარმონიულობის პირობა მაქსიმალური ენერგიის შემოწმების საშუალებით (მაქსიმალური ენერგიის 2% მნიშვნელობამდე დაცემა გაუსის ტიპის ალგზნებისათვის). მას შემდეგ, რაც ყველა საკონტროლო წერტილში მივიღებთ, რომ გვაქვს სტაბილურობა, ე.მ. ძრავა იმპულსის კიდევ ერთი პერიოდის განმავლობაში მუშაობს და ამ დროს ხდება ყველა საჭირო ფიზიკური სიდიდის დათვლა (SAR, იმპედანსი, ველის დიაგრამა, დენები და ა.შ.).

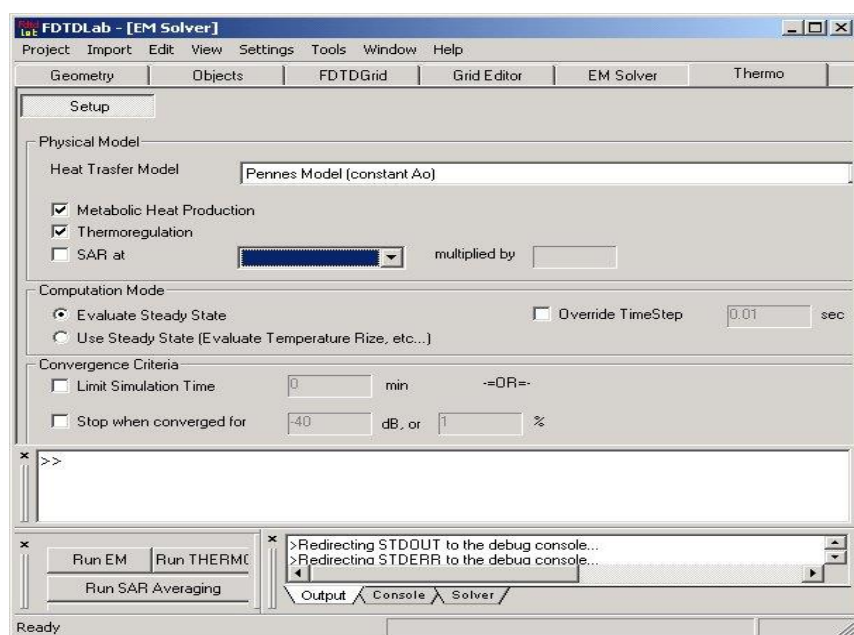
თერმული ძრავა იყენებს იგივე სივრცულ ბადეს და ნივთიერებების ბაზას, რასაც ემ ძრავა. ამას გარდა, თერმული ძრავა შეიძლება გამოყენებულ იქნას ემ ამოცანისაგან დამოუკიდებლად, მხოლოდ თერმული ამოცანების ამოხსნისათვის. როგორც ზემოთ აღვნიშნეთ, პროგრამაში "ჩადებულია" პენესის მოდელი, რომელიც ითვალისწინებს სითბოს მეტაბოლური წარმოქმნის მექანიზმს, სითბორეგულაციას სისხლის მომოქცევის გზით და ემ წყაროს მიერ წარმოქმნილ SAR-ს ქსოვილში. თერმული ამოცანის ამოხსნისათვის, თავდაპირველად საჭიროა სითბური განაწილების პოვნა

სითბოს გარე წყაროების გარეშე. ან ვთქვათ, გვაქვს რამდენიმე წყარო და გვაინტერესებს, თუ რა გავლენას მოახდენს ახალი წყარო. ამისათვის მომხმარებელს შეუძლია, ჯერ ჩაატაროს არსებული წონასწორული სითბური განაწილების გამოთვლა და იპოვნოს ტემპერატურული განაწილება, ხოლო შემდეგ "ირთვება" გარე წყარო, და გამოითვლება ახალი ტემპერატურული განაწილება და შესაბამისი ტემპერატურის ცვლილება უკვე წონასწორულ სითბურ განაწილებასთან მიმართებაში.

პროგრამა თვითონ ითვლის საჭირო დროით ბიჯს, თუმცა მომხმარებელს შესაძლებლობა აქვს მიუთითოს საკუთარი დროითი ბიჯიც (წმ). ასევე, შესაძლებელია სათვლელი დროის ხანგძლივობის მითითებაც (წთ). აქაც, ისევე როგორც ემ ძრავის შემთხვევაში, პროცესის სტაბილურობა მოწმდება ე.წ. საკონტროლო წერტილებში. მომხმარებელს ასევე საშუალება აქვს აირჩიოს სხვა წერტილებიც სტაბილურობის შემოწმებისათვის. პროცესის სტაბილურობის კრიტერიუმი არის შემდეგი:

მოცემულ საკონტროლო წერტილებში, გამოთვლილი ტემპერატურა ახალ დროით ბიჯზე, არ უნდა განსხვავდებოდეს წინა ბიჯზე არსებულ ტემპერატურისგან რაღაც ? მცირე სიდიდით, (რომელსაც ასევე მომხმარებელი იძლევა %-ში).

მომხმარებელს ასევე შეუძლია გამოიკვლიოს სითბური ამოცანა სხვადასხვა სიმძლავრის გარე წყაროს შემთხვევაში კოეფიციენტის შემოტანით (სურ. 3.2.3).



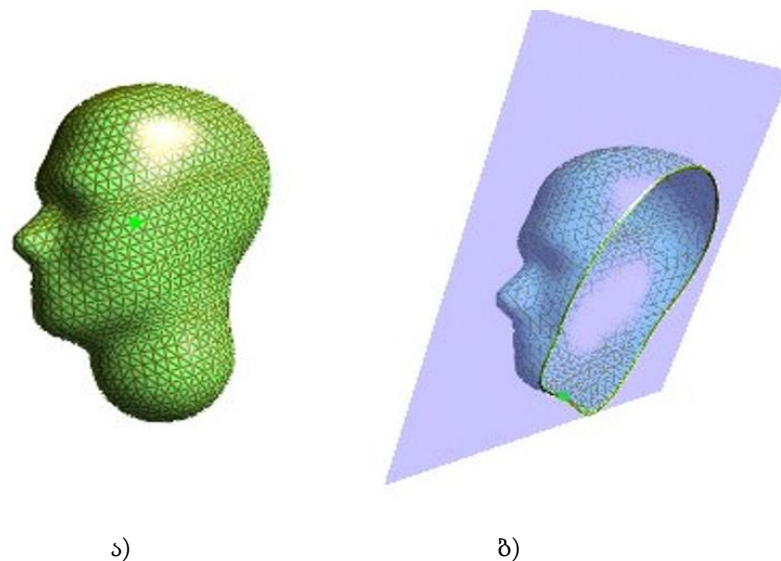
სურათი 3.2.3. თერმული ძრავა

უნდა აღინიშნოს, რომ პროგრამა სრულიად ობიექტურად ორიენტირებულია. პროგრამაში თითოეული ობიექტი ერთმანეთისგან დამოუკიდებელია და "მოქმედებს" სივრცულ ბადეზე, სადაც ყოველ ახალ დროით ბიჯზე ხდება ემ ველების განახლება, ხოლო თერმული ძრავის შემთხვევაში კი – ტემპერატურის. ეს საშუალებას იძლევა, საჭიროების შემთხვევაში, დამატებულ იქნას ახალი ობიექტები პროგრამის უკვე არსებული კოდის შეუცვლელად, რაც კიდევ უფრო ზრდის პროგრამის გამოყენებადობას (შოშიაშვილი 2006).

3. 3. მიღებული შედეგების კომპიუტერული დამუშავება და ვიზუალიზაცია

პროგრამის ერთ-ერთი აუცილებელი შემადგენელი ნაწილია შედეგების ვიზუალიზაცია-დამუშავების ბლოკი. უნდა აღინიშნოს, რომ ბევრ პროგრამულ შესაძლებლობას, რაც შექმნილია თსუ გამოყენებითი ელექტროდინამიკის და რადიო-ინჟინერიის ლაბორატორიაში (შოშიაშვილი 2006), ანალოგი არ აქვს. მაგალითად, მოცულობითი მონაცემების ვიზუალიზატორი: მომხმარებელს, თავისი სურვილის მიხედვით, შესაძლებლობა აქვს შექმნას რამდენიმე სიბრტყე, და ამ სიბრტყეთა მოძრაობით გამოიკვლიოს მოცულობითი შედეგები.

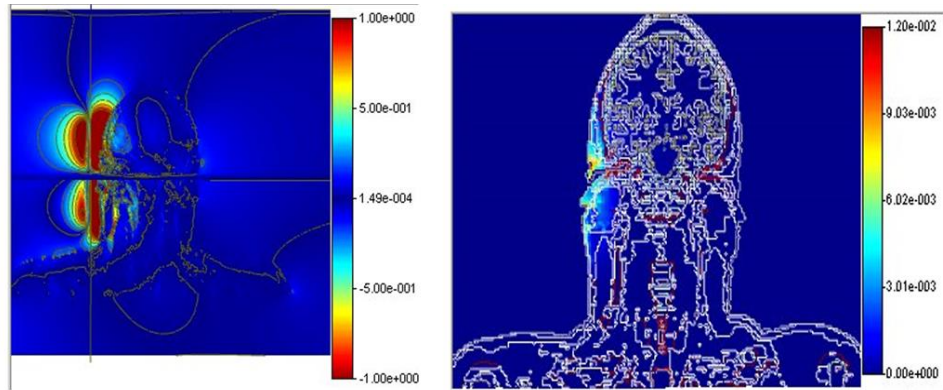
მომხმარებელს შეუძლია ნახოს როგორც ველების, ასევე SAR და ტემპერატურის განაწილების სურათები, როგორც დინამიკაში, ასევე სტატიკაში; დენის, ძაბვის, ტემპერატურის დამოკიდებულება დროზე მოცემულ წერტილში, ან მოცემულ წერტილთა სიმრავლეზე (ზოგადად რაიმე ზედაპირზე).



სურათი 3.3.1. თავის მოდელი 3D ვიზუალიზატორში: ა) სრული; ბ) სიბრტყით წაკვეთილი

OpenGL ძრავაზე ბაზირებულ ვიზუალიზატორს, გარდა სტანდარტული ბრუნვის, წანაცვლების და სკალირების ფუნქციებისა, აქვს შემდეგი შესაძლებლობები: პერპექტიული და ორთოგონალური ხედვა, ნისლის ეფექტი, გლუვი/-ხისტი ხედვა (ფერების მიხედვით), გამჭვირვალობა. პროგრამაში ჩადებული სიმეტრიული და არასიმეტრიული პალიტრები საშუალებას იძლევა მაქსიმალურად, ადეკვატურად

იქნას ვიზუალიზირებული მიღებული შედეგები. მომხმარებელს შეუძლია შეიტანოს გამოსაკვლევი ფიზიკური სიდიდის შესაძლო მინიმალურ და მაქსიმალური მნიშვნელობების საზღვრები, და ვიზუალიზატორი გვიჩვენებს მოცემულ მნიშვნელობებს ამ ახალ სკალაზე.



ა)

ბ)

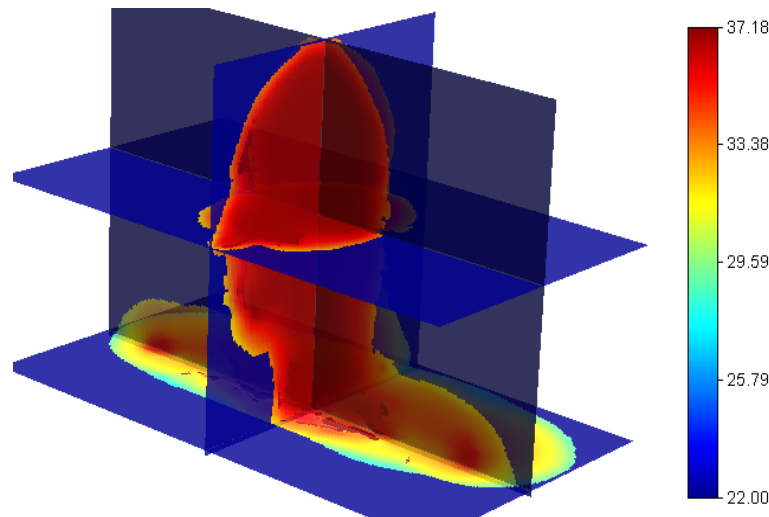
სურათი 3.3.2. იზოწირები და ნივთიერებათა კონტურები: ა) იზოწირები; ბ) SAR და ნივთიერებათა კონტურები

ჩვეულებრივი, ფიზიკური სკალის გარდა, ასევე შესაძლებელია გამოყენებულ იქნას დეციბელური სკალაც. ვიზუალიზატორს შესაძლებლობა აქვს ემ, დენების, ტემპერატურული და სითბოს ნაკადების ველების გარდა "ჩართოს/-გამორთოს" ამოცანის გეომეტრია; აჩვენოს ობიექტის გეომეტრია და ფიზიკური მონაცემები, როგორც ფერებში, ასევე ბადის სახით;

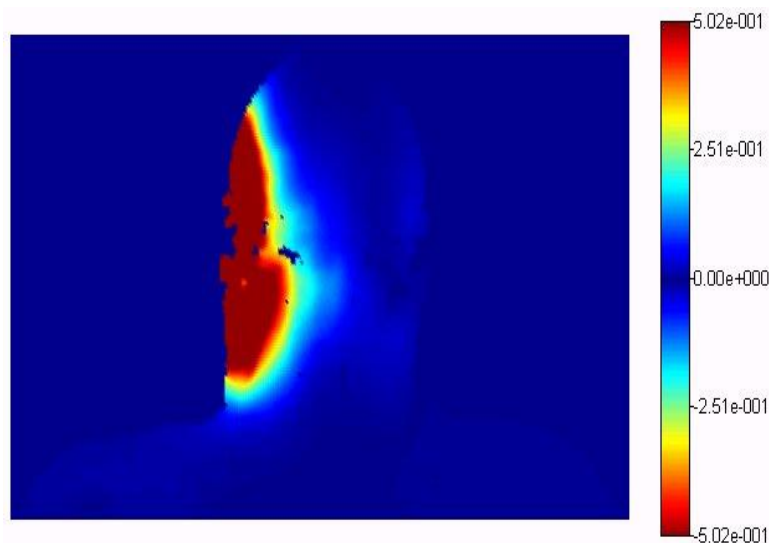
აჩვენოს მომხმარებლის მიერ წინასწარ განსაზღვრული რაოდენობის იზოწირები; ასევე, ერთი და იგივე ნივთიერების მქონე "უჯრების" კონტურები SAR განაწილებასთან ერთად. გათვალისწინებულია ასევე „მკვეთავი“ სიბრტყე, რაც საშუალებას იძლევა მოიკვეთოს გეომეტრიის ნაწილი როგორც საკოორდინატო ღერძების პარალელური, ასევე დახრილი სიბრტყეებით.

გამოსავალი ფაილების მარტივი და მოხერხებული ფორმატი უზრუნველყოფს მიღებული შედეგების გარემოში დამუშავებასაც. პროგრამას აქვს სკრიპტული ენების მხარდაჭერა (JavaScript და Visual Basic (VB — დაპროგრამების პოპულარული სისტემა), რაც გამოთვლითი პროცესების ავტომატიზაციის საშუალებას იძლევა (შოშიაშვილი, 2006).

2D ვიზუალიზატორი გამოსავალი ფიზიკური სიდიდეების (დენი, ველების კომპონენტები, ტემპერატურა) პარამეტრული გამოკვლევის საშუალებას იძლევა. მაგალითად, ველი (ტემპერატურა) წირის გასწვრივ, ან ველი (ტემპერატურა) მოცემულ წერტილში დროის მიხედვით და ა.შ.



სურათი 3.3.3. ტემპერატურის პირველადი განაწილება



სურათი 3.3.4. ტემპერატურის ცვლილება ბაზური განაწილებიდან

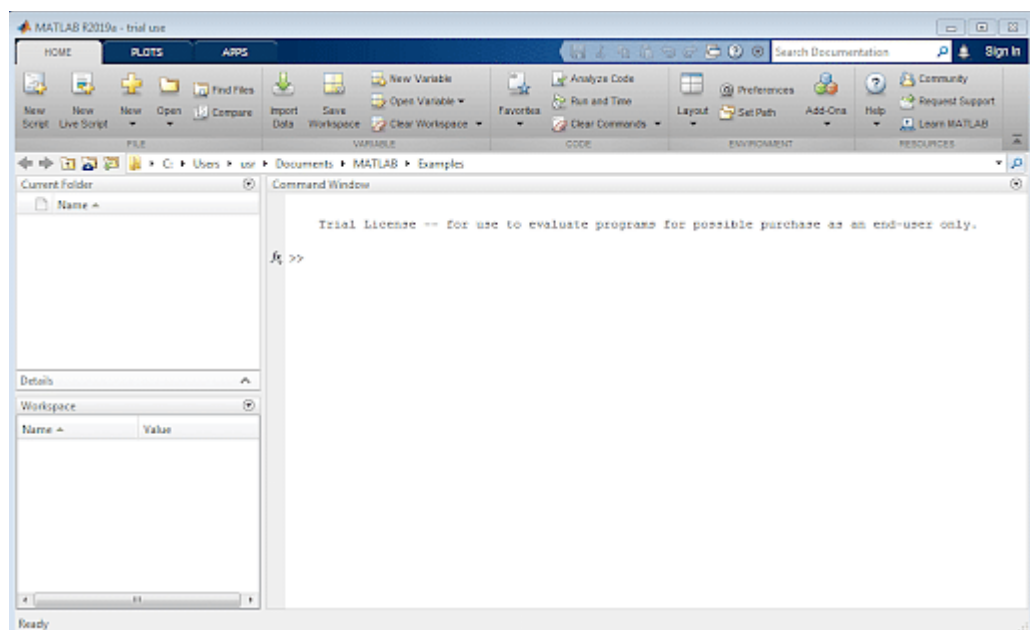
დასკვნა: ამრიგად, განხილულ იქნა თსუ გამოყენებითი ელექტროდინამიკის და რადიოინჟინერიის ლაბორატორიაში შექმნილი პროგრამული პაკეტის შესაძლებლობები, რომელსაც შეიძლება ითქვას ანალოგი არ აქვს. აღსანიშნავია, რომ მოცემული პაკეტი დასმული ამოცანის როგორც ემ, ასევე თერმული ნაწილის სრული გამოკვლევის შესაძლებლობას იძლევა. განხილული პროგრამა შეიძლება გამოყენებულ იქნას არა მარტო ცოცხალ ორგანიზმებზე ემ გავლენის შესასწავლად,

არამედ სხვა ამოცანებისათვისაც, სადაც ასევე აუცილებელია ემ და თერმული პროცესების შესწავლა. პროგრამა შექმნილია ობიექტურად ორიენტირებადი პროგრამირების მიდგომით, რაც მისი შესაძლებლობების ადვილად გაფართოების საშუალებას იძლევა (შოშიაშვილი 2006).

MATLAB

მიღებული რიცხვითი შედეგების ვიზუალიზაციისათვის (დიაგრამები და გრაფიკები) ასევე, გამოყენებული იქნა მაღალი დონის პროგრამული ენა MATLAB. ის აერთიანებს გამოთვლებს, ვიზუალიზაციას და პროგრამირებას ადვილად გამოსაყენებელ გარემოში, სადაც ამოცანები და შესაბამისი ამოხსნები (მიღებული შედეგები) გამოხატულია ნაცნობი მათემატიკური აღნიშვნით. მისი ტიპური გამოყენება მოიცავს:

- მათემატიკა და გამოთვლები
- ალგორითმის შემუშავება
- მოდელირება, სიმულაცია და პროტოტიპირება
- მონაცემთა ანალიზი, გამოკვლევა და ვიზუალიზაცია
- სამეცნიერო და საინჟინრო გრაფიკა
- აპლიკაციის შემუშავება, მომხმარებლის გრაფიკული ინტერფეისის ჩათვლით



MATLAB არის პროგრამული უზრუნველყოფა, რომელიც შეიქმნა MathWorks-ის მიერ. იგი გამოიყენება მონაცემთა ანალიზისთვის, ვიზუალიზაციისთვის და ტექნიკური გამოთვლებისთვის. MATLAB-ის მომხმარებლებს აქვთ წვდომა მაღალი დონის პროგრამირების ენაზე, რაც აადვილებს რთული საინჟინრო, სამეცნიერო და მათემატიკური საკითხების მოგვარებას.

MATLAB, ან Matrix Laboratory, უფრო და უფრო სარგებლობს მეცნიერთა შორის პოპულარობით მისი პირველადი დებიუტიდან 1984 წელს. დღეს მას ფართოდ იყენებენ მილიონობით სტუდენტი და მეცნიერი ტექნოლოგიების, ინჟინერიისა და მათემატიკის (STEM) სფეროებში. ეს არის ზოგადი დანიშნულების გამოთვლითი ენა, პითონის მსგავსი. მომხმარებლებს შეუძლიათ განავითარონ მომხმარებლის გრაფიკული ინტერფეისები (GUI), დაამუშაონ და ვიზუალიზაცია გაუკეთონ მონაცემებს, დაამუშაონ სურათები და აუდიო, დაუკავშირდნენ აპარატურას (როგორიცაა Arduino მიკროკონტროლერი) და მრავალი სხვა.

თავი IV. კომპიუტერული მოდელირებით ადამიანის რეალისტური რიცხვითი მოდელების კვლევა

შესავალი

დისერტაციის მოცემული ნაწილის მიზანია შემუშავდეს და გამოიკვლეოს იქნას რეალისტური რიცხვითი მოდელები მობილური ტელეფონების ტესტირებისთვის ელექტრომაგნიტური უსაფრთხოების თვალსაზრისით.

ემ ველის სახე და მნიშვნელობა ელექტროდინამიკაში ხასიათდება გამომსხივებლის - ანტენის „შეთანხმებით“ თავისუფალ გარემოსთან, ანუ, S11 კოეფიციენტით (ნოზაძე 2018), (Liu 2016, 739-746).

ცნობილია, რომ ახლო ველის ზომა როგორც გადამცემი ასევე მიმღები ანტენების დამოკიდებული არის მთლიანად გამომსხივებლის ტალღის სიგრძეზე და ზომაზე. ცუდი შეთანხმებისას მიმღები და ასევე გადამცემი ანტენის ახლო ველის ზონაში ჩნდება ძლიერი, მაღალი რიცხვითი მნიშვნელობის მდგარი ტალღა; ანუ რეაქტიული ველები (ნოზაძე 2018). E/H შეფარდება ამ ზონაში მნიშვნელოვნად იცვლება და ანტენის თავისუფალ გარემოსთან შეთანხმების პირობებზე არის დამოკიდებული. ამ დროს იზრდება გენერატორში უკან არეკვლილი ემ ველი და შედეგად, იცვლება - S11 კოეფიციენტი (Liu 2016, 739-746).

E ველი, მობილურის სიხშირის დიაპაზონში, განსაზღვრავს SAR-ს - შთანთქმულ კუთრ სიმძლავრეს, ტელეფონების მიხედვით. რამდენადაც შთანთქმის კუთრი სიმძლავრე დამოკიდებული არის E ველზე მხოლოდ, ამიტომ მნიშვნელოვანია შეფარდების - E/H მაქსიმალურად შემცირება; რაც ანტენის პარამეტრების საუკეთესოდ შეთანხმებით მიიღწევა, როდესაც რეაქტიული ელექტრული ველის დაძაბულობა არის დაბალი (ნოზაძე 2018) (Keshvari 2012) რამდენადაც, თავის, ხელის ზომები, და მათი პოზიცია/მდებარეობა შესაძლებელია შევადაროთ მობილური ტელეფონის დიაპაზონის ტალღის სიგრძეს; ამიტომ მათი პოზიციით გამრბენი ველის პირობა განისაზღვრება. ემ ველების გავრცელების გზაზე ნებისმიერი ცვლილება წარმოქმნის არეკვლილ ტალღებს, ხოლო მათი ფაზური წანაცვლება ზემოქმედებს თავისუფალ სივრცესთან ანტენის შეთანხმებაზე. კარგი შეთანხმებისას გვაქვს ზუსტად ისეთივე გამრბენი ტალღა, რომელიც ობიექტის ზედაპირის გასწვრივ

მოედინება კვების წყაროს მინიმალური დამაბულობისას, რაც აუცილებელია საბაზო ანტენასთან კავშირისათვის. ანტენის ახლო ველის ზონაში მეტწილად არის რეაქტიული ველები; აღნიშნული გულისხმობს, რომ ელექტრული და მაგნიტური ველები არ ემთხვევიან ფაზაში ერთმანეთს, გამრბენი ტალღისაგან განსხვავებით, სადაც ველები არიან ერთ ფაზაში და ურთიერთმართობული (ნოზაძე 2018), (Balanis 2005, 1-1074).

მობილური ტელეფონით კომუნიკაციის დროს ადამიანის ხელი და თავი, რომლებიც მობილური ტელეფონის ანტენის ახლო ზონაში მდებარეობენ, მნიშვნელოვანად მოქმედებენ (S11) - თავისუფალ სივრცესთან ანტენის შეთანხმებაზე. უსაფრთხოების ერთადერთ კრიტერიუმს, რომელიც ზოგადად გამოიყენება რადიოსიხშირული ზეგავლენის შესაფასებლად ადამიანებზე, წარმოადგენს შთანთქმის კუთრი სიჩქარე (SAR). SAR-ის დასაშვები ზღვრული მნიშვნელობა განსაზღვრულია თითოეული მობილური ტელეფონის მოდელისათვის მწარმოებლების მიერ. რიცხვითი ექსპერიმენტების დროს რთულია და რიგ შემთხვევაში შეუძლებელი ყველა დეტალის გათვალისწინება, როგორიცაა SAR-ის დამოკიდებულება ანტენის შეთანხმებაზე, განსხვავებული ფორმა, ზომა და სხვ. მნიშვნელოვანია აღინიშნოს, რომ S11 კოეფიციენტის მნიშვნელობა დამოკიდებულია ურთიერთქმედების სცენარებზე და იმ ფაქტზეც, რომ მობილურ ტელეფონებს გააჩნიათ AGC (Automatic Gain Control), ავტომატურად ზრდიან სიმძლავრეს, როდესაც კავშირი საბაზო სადგურთან სუსტდება.

4. 1. ქალის და ბავშვის არაერთგვაროვანი რიცხვითი მოდელები

ვირტუალური პოპულაციის (ViP) მოდელები არის დეტალური მაღალი რეზოლუციის ანატომიური მოდელების ნაკრები, რომელიც შექმნილია მოხალისეთა მაგნიტურ-რეზონანსული გამოსახულების მონაცემებით. შექმნის დღიდან, ViP მოდელები გახდა ოქროს სტანდარტი სილიკო-ბიოფიზიკური მოდელირების აპლიკაციებში.

რიცხვითი ექსპერიმენტები, რომლებიც განხორციელდა დისერტაციის ფარგლებში, მოითხოვს მძლავრ კომპიუტერულ რესურსს. რამდენადაც, საჭიროებს ადამიანის მაღალი სიზუსტის რეალისტური 3D მოდელების დამუშავებას გრაფიკული პროგრამის გამოყენებით და დისკრეტიზაციის ზომის შერჩევას FDTD მოდელირებისთვის შერჩეულ სიხშირეებზე. როგორც ვიცით FDTD მეთოდის მიხედვით, გამოთვლითი არე იყოფა კუბებად სამგანზომილებიანი სწორხაზოვანი ბადის გამოყენებით. ტალღის სიგრძის, დასასხივებელი ობიექტების მახასიათებლების, ზომისა და სასურველი სივრცული სიზუსტის გათვალისწინებით, დისკრეტიზაციისთვის გამოიყენება განსხვავებული სივრცული ბიჯი. რადგანც FDTD არის დროითი დომენის ტექნიკა, მას სჭირდება წინასწარ განსაზღვრული სიმულაციის დრო, რათა მივაღწიოთ სტაბილურ მდგომარეობას, რაც კვლავ დამოკიდებულია არჩეულ სივრცულ ბიჯზე, ტალღის სიგრძეზე და გამოთვლითი სივრცის ზომაზე. როგორც აღინიშნა, რიცხვითი სიმულაციები ჩატარდა FDTD-ზე დაფუძნებული პროგრამის პაკეტის FDTD Lab-ის ემ და თერმული ამომხსნელის გამოყენებით. აღნიშნული პროგრამა ჩვეულებრივი მონაცემების კომპიუტერის შემთხვევაში ვერ კითხულობს ასეთი მაღალი სიზუსტის ადამიანის მოდელებს და მათზე ემ ველის ზემოქმედების გამოსაკვლევად საჭირო გამოთვლების წარმოებაც, შესაბამისად, შეუძლებელი იქნება. დისერტაციით დაგეგმილი კვლევები განხორციელდა მძლავრ კომპიუტერზე.

ადამიანის მთლიანი სხეულის კომპიუტერული ანატომიური მოდელები ვირტუალური ოჯახი თავდაპირველად შეიქმნა ელექტრომაგნიტური (EM) გამოსხივების შესაფასებლად. კერძოდ იმის შესასწავლად, თუ როგორ არის დამოკიდებული გარე წყაროს რადიოსიხშირული გამოსხივების ენერგიის შთანთქმა

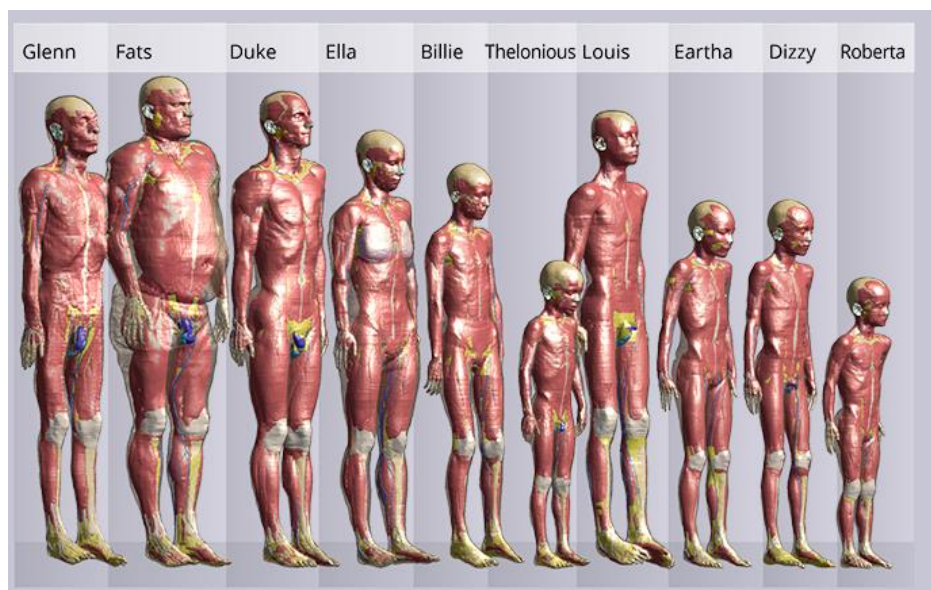
ადამიანის ანატომიაზე. თუმცა, მოდელებმა მაშინვე დაიმსახურეს უფრო ფართო ინტერესი და ამჟამად, გამოიყენება 300-ზე მეტი კვლევითი ჯგუფის მიერ, რომელთა უმრავლესობა სამედიცინო სფეროდან არის. ვირტუალური ოჯახი გაფართოვდა როგორც ვირტუალურ პოპულაცია, რათა უზრუნველყო ადამიანის მოდელების უფრო ფართო სპექტრის დაფარვა და მოიცავდეს ორივე სქესის მოდელებს 5-დან 84 წლამდე.

მიუხედავად იმისა, რომ ეს მოდელები ფასდაუდებელი აღმოჩნდა EM დოზიმეტრიისთვის და ცხადი გახდა, რომ საჭიროა მნიშვნელოვნად გაუმჯობესებულიყო მოდელები, რათა საიმედოდ შეფასდეს დიაგნოსტიკური და თერაპიული კუთხით მათი გამოყენების ეფექტურობა და უსაფრთხოება, მათ შორის სამედიცინო იმპლანტების უსაფრთხოების შეფასების თვალსაზრისით.

დისერტაციის ფარგლებში დაგეგმილი რიცხვითი ექსპერიმენტები ჩატარდა თსუ გამოყენებითი ელექტროდინამიკის ლაბორატორიაში სპეციალურად ასეთი სახის კვლევების განხორციელებისათვის შექმნილი პროგრამული პაკეტის FDTDLab-ის საშუალებით. როგორც აღვნიშნეთ, FDTDLab პროგრამა ეფუძნება FDTD - დროით არეში სასრული სხვაობების მეთოდს, იგი წარმოადგენს მაქსველის განტოლებების დისკრეტიზაციას სხვაობების მეთოდით (ჯელაძე 2015).

აღსანიშნავია, რომ განხილულ მოდელებს სჭირდებათ მინიმუმ 4 GB ოპერატიული მეხსიერება V1-x-ისთვის და 6 GB V3-x/V4-0-ისთვის. მოდელების გარჩევადობიდან გამომდინარე, მეხსიერების მოთხოვნები ვოქსელის მოდელების ჩატვირთვისა და დამუშავებისთვის შეიძლება იყოს ძალიან მაღალი.

დისერტაციის ფარგლებში განხილულ კვლევაში, გამოთვლის არის (დისკრეტული ბადე) თითოეული უჯრედის ზომა არის 1 მმ. რიცხვითი გამოთვლებისათვის გამოყენებულია 1მმ დისკრეტიზაციის ქალის “Ella”- და ბავშვის - „Thelonious“ არაერთგვაროვანი სამგანზომილებიანი დისკრეტული მოდელები (Virtual Population) (ნოზაძე 2018).



სურათი 4.1.1. ადამიანის მოდელები „Virtual Population“.

ვირტუალური პოპულაციის - ViP მოდელები არის დეტალური მაღალი რეზოლუციის ანატომიური მოდელების ნაკრები სურ. 4.1.1.



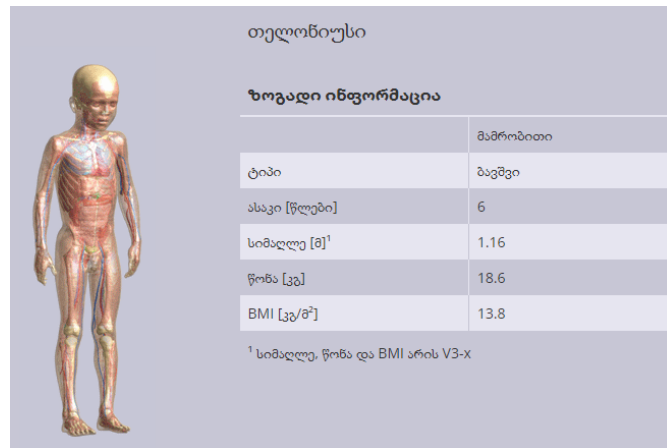
ელა

ზოგადი ინფორმაცია

	ქალი
ტიპი	ახალგაზრდა ზრდასრული
ასაკი [წლები]	26
სიმაღლე [მ] ¹	1.63
წონა [კგ]	57.3
BMI [კგ/მ²]	21.6

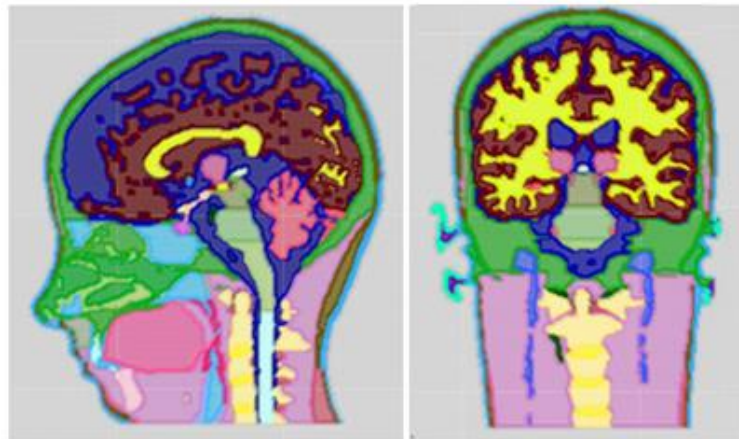
¹ სიმაღლე, წონა და BMI არის V3-X

(ა)

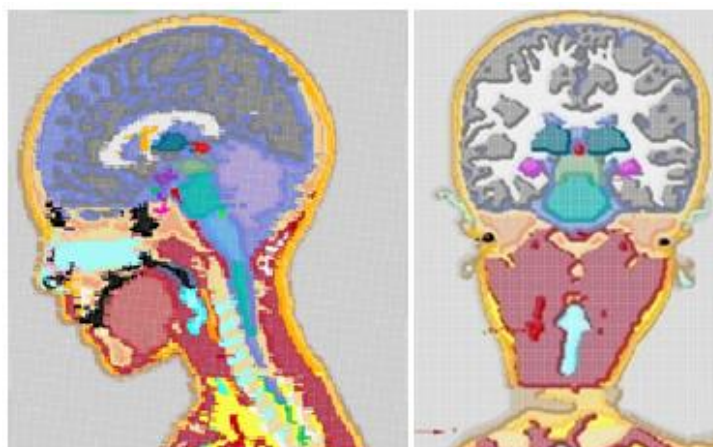


(ბ)

სურათი 4.1.2. ქალის „Ella“ (ა) და ბავშვის „Thelonioussi“ სამგანზომილებიანი (3D) მოდელების ფიზიკური მონაცემები (ბ).



სურათი 4.1.3. სხვადასხვა სიბრტყეში ქალის „Ella“ დისკრეტული თავის არე.



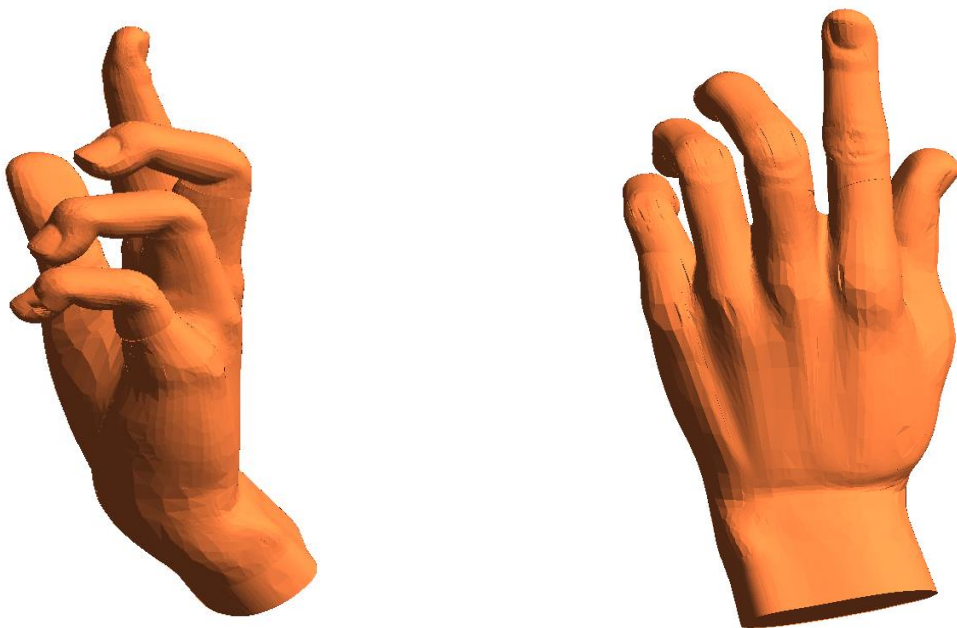
სურათი 4.1.4. სხვადასხვა სიბრტყეში ბავშვის „Thelonioussi“ დისკრეტული თავის არე.

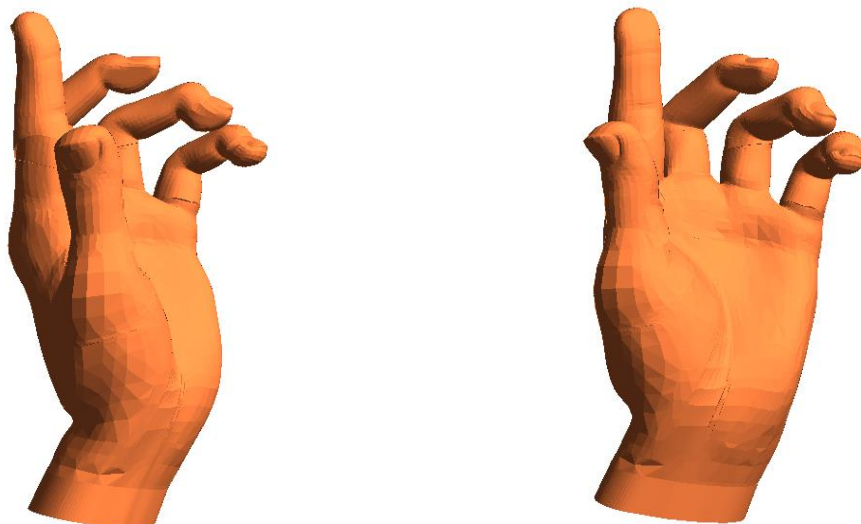
ამ მოდელების (სურ. 4.1.4) ფაილები გაფართოებით **.cells** იხსნება გამოყენებითი ელექტროდინამიკისა და რადიოტექნიკის ლაბორატორიაში (თსუ) ადამიანზე ემ ზეგავლენის კვლევისათვის შექმნილი FDTDLab პროგრამული პაკეტის დამხმარე პროგრამის MyFDTD-ის მეშვეობით (ჯელაძე 2015), MyFDTD-ის მეშვეობით შესაძლებელი არის მათი დამუშავება, საკვლევი სეგმენტის მაგალითად, ამოიჭრას თავის არე, სხვადასხვა სახის ანტენის დაყენება და ა.შ; გრაფიკულ პროგრამა - 3D MAX-ით მომზადდა მობილური ტელეფონის და ასევე, ხელის მოდელები განსხვავებული პოზიციებით (ნოზაძე 2018), (ქურციკიძე 2022).

ხელის ორი პოზიცია მომზადდა ზრდასრული ადამიანის-ქალის მოდელისთვის:

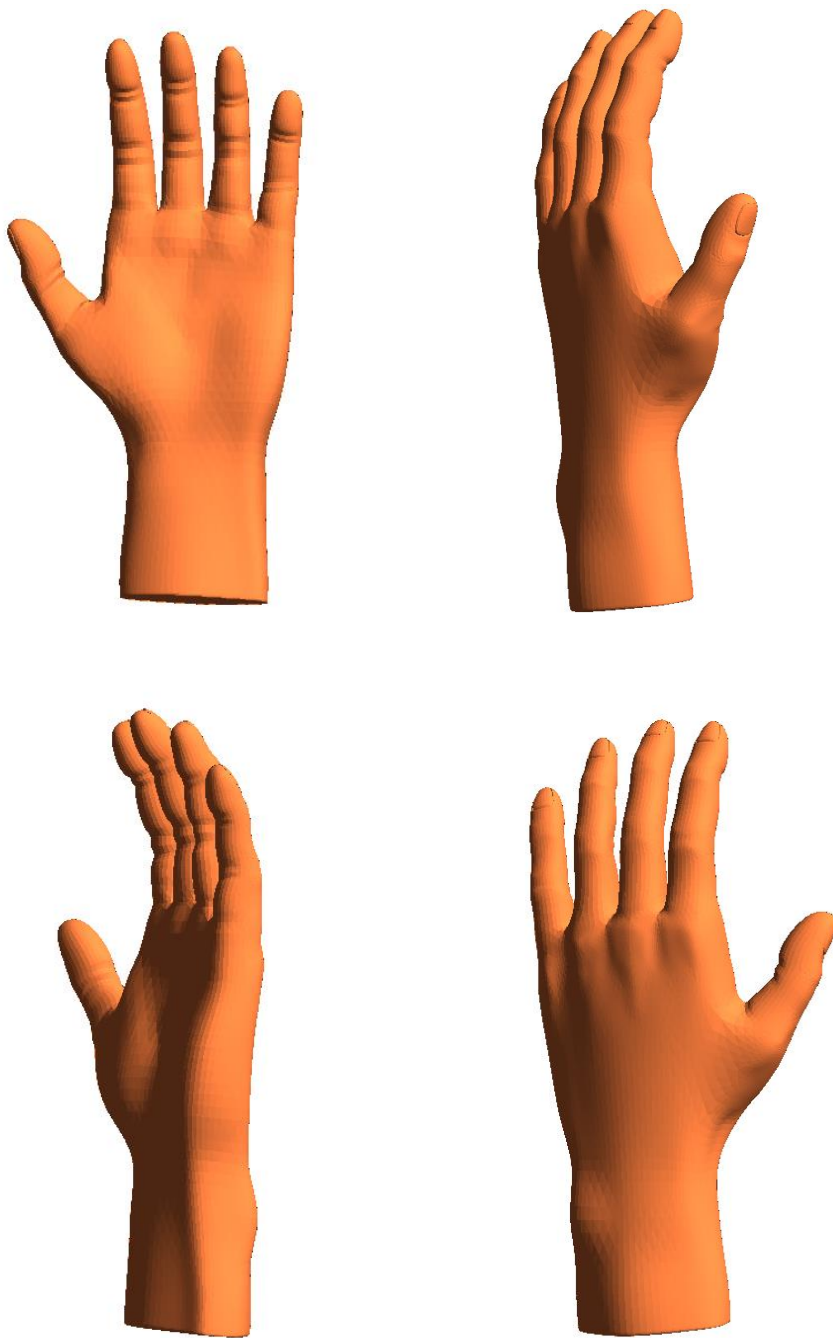
hand 1- მობილური ტელეფონი დაჭერილია თითებით მხოლოდ.

hand 2- მობილური ტელეფონი ეხება ხელის გულს და გვიჩირავს მთლიანი ხელის მტევნით.





სურათი 4.1.4.1. შექმნილი ხელის მოდელი Hand 1- პოზიციით, სხვადასხვა რაკურსით.



სურათი 4.1.4.2. შექმნილი ხელის მოდელი Hand 2- პოზიციით, სხვადასხვა რაკურსით.



(ა)



(ბ)

სურათი 4.1.4.3. შექმნილი ხელის მოდელი ტელეფონის მოდელთან ერთად Hand 1 და Hand 2-პოზიციით.

ხოლო ბავშვის მოდელისთვის მომზადებული იქნა ერთი პოზიცია ხელის მხოლოდ, რადგან ბავშვის ხელი ზომა მობილური ტელეფონის ზომის ტოლია დაახლოებით. მობილური ტელეფონი, ხელი თავის მოდელიდან განთავსდა 1მმ, 10მმ, 20მმ დაშორებებით. განხილული/შესწავლილი ადამიანის მოდელები წარმოდგენილი არის სურ. 4.1.3 და სურ. 4.1.4-ზე.

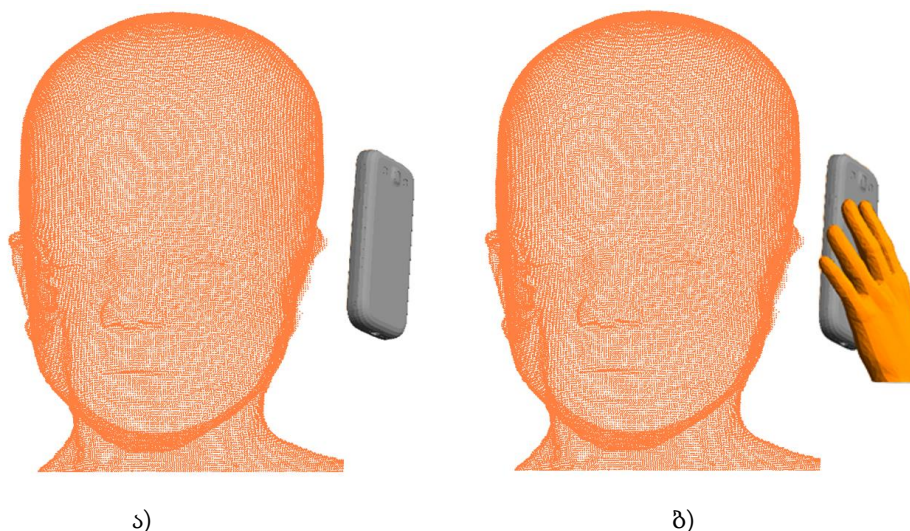


ა)



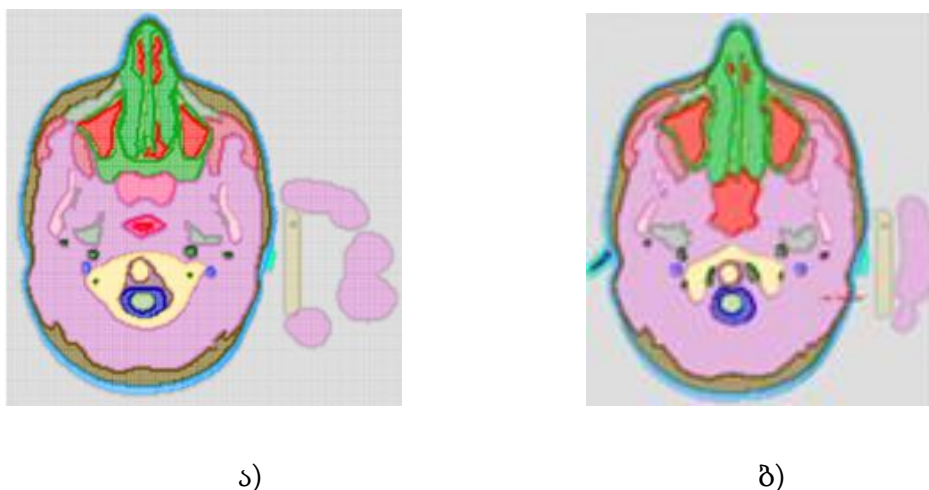
ბ)

სურათი 4.1.4. 3D გეომეტრიები: ზრდასრული ადამიანის-Ella თავის მოდელის, მობილური ტელეფონის ხელთან ერთად ა) hand 1, ბ) hand 2 .



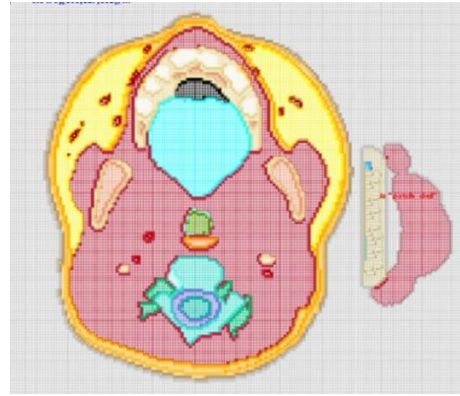
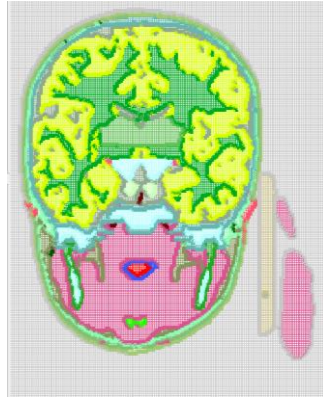
სურათი 4.1.5. 3D გეომეტრიები: ბავშვის თავის მოდელის, მობილური ტელეფონის : ა) მხოლოდ ტელეფონი; ბ) ხელთან ერთად .

განხილული მოდელები შეიცავენ სხვადასხვა სახის, დიელექტრიკული თვისებების მქონე 80 - ქსოვილს. ხელი სიმარტივისათვის განხილული არის, როგორც კუნთოვანი ქსოვილი/ფანტომი (ნოზაძე 2018), ქსოვილის სიხშირეზე დამოკიდებული პარამეტრები, დიფრაქციის ემ ამოცანის ამოსახსნელად, აღებულია [IT'IS Foundation] ბაზიდან-დან; ხოლო ქსოვილის თერმული პარამეტრები, სითბური ამოცანის ამოხსნისათვის, გამოყენებულია [IT'IS Foundation] ბაზიდან. მოდელებისათვის 2100, 3700 [მგჰც] სიხშირეების სინუსოიდალური ფორმის ტალღა შეირჩა.

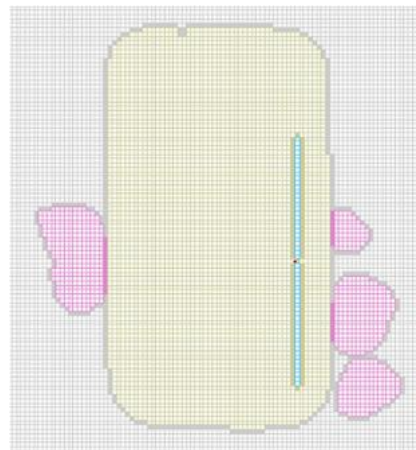
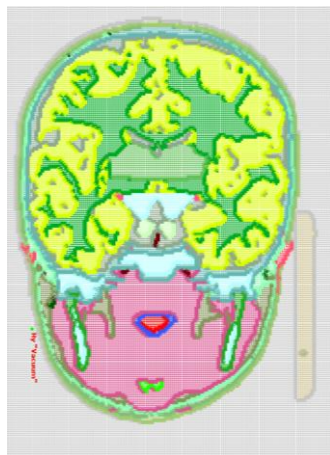


სურათი 4.1.6. ქალის დისკრეტული თავის მოდელი წარმოდგენილი სხვადასხვა კვეთაში/სიბრტყეში, მობილური ტელეფონთან ერთად. ა) **Hand 1**; ბ) **Hand 2**

მობილური ტელეფონის ზომები არის $L \times W \times H, 5 \times 0.8 \times 9$ [სმ], მასში ჩაშენებული არის დიპოლური ანტენა. $\epsilon=2$ - არის მობილური ტელეფონის ქეისის დიელექტრიკული შეღწევადობა. მობილური ტელეფონი, დისკრეტული მოდელები ადამიანის თავის, ხელის პოზიციები სხვადასხვა სიბრტყით კვეთაში ნაჩვენებია სურ. 4.1.4 და სურ. 4.1.6.



ა)



ბ)

სურათი 4.1.7. დისკრეტული მოდელი ბავშვის თავის, მობილურ ტელეფონთან ერთად: ა) ხელთან ერთად სხვადასხვა სიბრტყეში; ბ) მხოლოდ ტელეფონი.

ქსოვილი	წყარო	შელწევადობა	ელექ. გამტარ. (S/m)
თირკმელზედა ჯირკვალი	თირკმელზედა ჯირკვალი	5.83E+01	1.00E+00
ჰაერი	ჰაერი	1.00E+00	0.00E+00
ნადველი	ნადველი	6.87E+01	2.51E+00
სისხლი	სისხლი	5.89E+01	2.26E+00
სისხლის პლაზმა		0.00E+00	0.00E+00
სისხლის შრატ		0.00E+00	0.00E+00
სისხლძარღვის კედელი	სისხლძარღვის კედელი	4.30E+01	1.23E+00
ძვალი (კანცელური)	ძვალი (კანცელური)	1.90E+01	6.85E-01
ძვალი (კორტიკალური)	ძვალი (კორტიკალური)	1.16E+01	3.28E-01
ძვლის ტვინი (წითელი)	ძვლის ტვინი (წითელი)	1.05E+01	3.98E-01
ძვლის ტვინი (ყვითელი)	ძვლის ტვინი (ყვითელი)	5.34E+00	8.07E-02
ტვინი	ცერებრული	4.55E+01	1.88E+00
ტვინი (რუხი ნივთიერება)	ტვინი (რუხი ნივთიერება)	4.95E+01	1.57E+00
ტვინი (თეთრი ნივთიერება)	ტვინი (თეთრი ნივთიერება)	3.66E+01	1.05E+00
მკერდის ცხიმ	მკერდის ცხიმ	5.21E+00	1.13E-01
სარძევე ჯირკვალი	ფარისებრი ჯირკვალი	5.77E+01	1.70E+00
ბრონქები	ტრაქეა	4.01E+01	1.26E+00
ბრონქების სანათური	ბრონქების სანათური	1.00E+00	0.00E+00
ხრტილი	ხრტილი	3.95E+01	1.49E+00
ცერებრული	ცერებრული	4.55E+01	1.88E+00
ცერებროსპინალური სითხე	ცერებროსპინალური სითხე	6.68E+01	3.15E+00
საშვილოსნოს ყელი	საშვილოსნოს ყელი	4.80E+01	1.51E+00

კომისურა წინა	ტვინი (თეთრი ნივთიერება)	3.66E+01	1.05E+00
Commissura Posterior	ტვინი (თეთრი ნივთიერება)	3.66E+01	1.05E+00
შემართებული ქსოვილი	მყესის/ლიგამენტი	4.37E+01	1.41E+00
დიაფრაგმა	კუნთები	5.32E+01	1.51E+00
Ductus Deferens	სისხლძარღვის კედელი	4.30E+01	1.23E+00
დურა	დურა	4.25E+01	1.47E+00
ეპიდერმისი	სათესლე ჯირკვალი	5.81E+01	1.90E+00
საყლაპავი მილი	კუჭი	6.27E+01	1.92E+00
საყლაპავის სანათური	საყლაპავის სანათური	1.00E+00	0.00E+00
უჯრედგარე სითხეები	ცერებროსპინალური სითხე	6.68E+01	3.15E+00
თვალი	ცერებროსპინალური სითხე	6.68E+01	3.15E+00
თვალი (ქოროიდი)	სისხლი	5.89E+01	2.26E+00
თვალი (ცილაური სხეული)	კუნთი	5.32E+01	1.51E+00
თვალი (რქოვანა)	თვალი (რქოვანა)	5.22E+01	2.05E+00
თვალი (ირისი)	კუნთი	5.32E+01	1.51E+00
თვალი (ლინზა)	თვალი (ლინზა)	3.43E+01	9.18E-01
თვალი (ზადურა)	ტვინი (ნაცრისფერი ნივთიერება)	4.95E+01	1.57E+00
თვალი (სკლერა)	თვალი (სკლერა)	5.31E+01	1.79E+00
თვალი (მინისებრი)	თვალი (მინისებრი)	6.84E+01	2.22E+00
თვალის ლინზა (ქერქი)	თვალის ლინზა (ქერქი)	4.50E+01	1.30E+00
თვალის ლინზა (ბირთვი)	თვალი (ლინზა)	3.43E+01	9.18E-01
ცხიმი	ცხიმი (საშუალო ინფილტრატი)	1.09E+01	2.24E-01
ცხიმი (საშუალო ინფილტრატი)	ცხიმი (საშუალო ინფილტრატი)	1.09E+01	2.24E-01

ცხიმი (არა ინფილტრატი)	ცხიმი (არა ინფილტრატი)	5.32E+00	8.99E-02
ნადვლის ბუშტი	ნადვლის ბუშტი	5.80E+01	1.82E+00
გულის სანათური	სისხლი	5.89E+01	2.26E+00
გულის კუნთი	გულის კუნთი	5.56E+01	1.98E+00
ჰიპოკამპი	ტვინი (რუხი ნივთიერება)	4.95E+01	1.57E+00
ჰიპოფიზი	ფარისებრი ჯირკვავი	5.77E+01	1.70E+00
ჰიპოთალამუსი	ტვინი (რუხი ნივთიერება)	4.95E+01	1.57E+00
ინტერვერტებრალური დისკი	ინტერვერტებრალური დისკი	4.03E+01	1.54E+00
თირკმელი	თირკმელი	5.36E+01	2.16E+00
თირკმელი (ქერქი)	თირკმელი	5.36E+01	2.16E+00
თირკმელი (მედულა)	თირკმელი	5.36E+01	2.16E+00
მსხვილი ნაწლავი	მსხვილი ნაწლავი	5.45E+01	1.78E+00
მსხვილი ნაწლავის სანათური	კუნთები	5.32E+01	1.51E+00
ხორხის	ხრტილი	3.95E+01	1.49E+00
ღვიძლი	ღვიძლი	4.36E+01	1.46E+00
ფილტვის	ფილტვი (გაბერილი)	2.07E+01	7.10E-01
ფილტვი	ფილტვი	4.89E+01	1.46E+00
ფილტვი (გაბერილი)	ფილტვი (გაბერილი)	2.07E+01	7.10E-01
ლიმფური	არცერთი	0.00E+00	0.00E+00
ლიმფნოდი	მეზენქიმული ლიმფური კვანძი	7.83E+01	9.11E-01
ქვედა ყბა	ძვალი (კორტიკალური)	1.16E+01	3.28E-01
მედულა გრძელი	ცერებრული	4.55E+01	1.88E+00
მენისკი	ხრტილი	3.95E+01	1.49E+00
შუა ტვინი	ცერებრული	4.55E+01	1.88E+00

ლორწოვანი გარსი	კუნთები	5.32E+01	1.51E+00
კუნთი	კუნთები	5.32E+01	1.51E+00
ნერვი	ნერვი	3.05E+01	9.51E-01
საკვერცხე	საკვერცხე	4.56E+01	2.02E+00
პანკრეასი	ფარისებრი ჯირკვალი	5.77E+01	1.70E+00
ფარინქსი	ჰაერი	1.00E+00	0.00E+00
სხეული	ფარისებრი ჯირკვალი	5.77E+01	1.70E+00
პლაცენტა	სისხლი	5.89E+01	2.26E+00
პონსი	ცერებრელი	4.55E+01	1.88E+00
პროსტატის	სათესლე ჯირკვალი	5.81E+01	1.90E+00
SAT (კანქვეშა ცხიმი)	ცხიმი (საშუალო ინფილტრატი)	1.09E+01	2.24E-01
სანერწყვე ჯირკვალი	სანერწყვე ჯირკვალი	7.44E+01	1.02E+00
სკალპი	კანი	3.84E+01	1.31E+00
სათესლე ბუშტუკი	სათესლე ჯირკვალი	5.81E+01	1.90E+00
კანი	კანი (მშრალი)	3.84E+01	1.31E+00
თავის ქალა	ძვალი (კორტიკალური)	1.16E+01	3.28E-01
თავის ქალა Cancellous	ძვლის სიმსივნური	1.90E+01	6.85E-01
თავის ქალა კორტიკალური	ძვალი (კორტიკალური)	1.16E+01	3.28E-01
წვრილი ნაწლავი	წვრილი ნაწლავი	5.52E+01	2.91E+00
წვრილი ნაწლავის სანათური	კუნთები	5.32E+01	1.51E+00
ზურგის ტვინი	ნერვი	3.05E+01	9.51E-01
ელენთა	ელენთა	5.32E+01	1.98E+00
კუჭი	კუჭი	6.27E+01	1.92E+00
კუჭის სანათური	კუნთი	5.32E+01	1.51E+00
მცესის\ლიგამენტი	მცესის\ლიგამენტი	4.37E+01	1.41E+00
თალამუსი	ტვინი (რუხი ნივთიერება)	4.95E+01	1.57E+00
თიმუსი	თიმუსი	5.09E+01	8.95E-01
ფარისებრი ჯირკვალი	ფარისებრი ჯირკვალი	5.77E+01	1.70E+00

ენა	ენა	5.31E+01	1.56E+00
კბილი	ძვალი (კორტიკალური)	1.16E+01	3.28E-01
კბილი (დენტინი)	ძვალი (კორტიკალური)	1.16E+01	3.28E-01
კბილი (მინანქარი)	ძვალი (კორტიკალური)	1.16E+01	3.28E-01
ტრაქეა	ტრაქეა	4.01E+01	1.26E+00
ტრაქეის სანათური	ტრაქეის სანათური	1.00E+00	0.00E+00
შარდსაწვეთი\ურეთრა	სისხლძარღვის კედელი	4.30E+01	1.23E+00
შარდის ბუშტის კედელი	შარდის ბუშტის კედელი	1.82E+01	6.00E-01
შარდი	შარდი	5.00E+01	1.75E+00
საშვილოსნო	საშვილოსნო	5.84E+01	1.97E+00
ხერხემალი	ძვალი (კორტიკალური)	1.16E+01	3.28E-01
წყალი		8.37E+01	1.00E+00

ცხრილი 4.1.1._ ქსოვილის პარამეტრები 2100 მგჰც სიხშირეზე

ქსოვილის	წყარო	შელწევადობა	ელექ. გამტარ. (S/m)
თირკმელზედა ჯირკვალი	თირკმელზედა ჯირკვალი	5.71E+01	1.31E+00
ჰაერი	ჰაერი	1.00E+00	0.00E+00
ნაღველი	ნაღველი	6.68E+01	4.12E+00
სისხლი	სისხლი	5.62E+01	3.79E+00
სისხლის პლაზმა	არცერთი	0.00E+00	0.00E+00
სისხლის შრატა	არცერთი	0.00E+00	0.00E+00
სისხლძარღვის კედელი	სისხლძარღვის კედელი	4.10E+01	2.35E+00
ძვალი (კანცელური)	ძვალი (კანცელური)	1.72E+01	1.28E+00
ძვალი (კორტიკალური)	ძვალი (კორტიკალური)	1.07E+01	6.59E-01
ძვლის ტვინი (წითელი)	ძვლის ტვინი (წითელი)	9.66E+00	7.02E-01

ძვლის ტვინი (ყვითელი)	ძვლის ტვინი (ყვითელი)	5.17E+00	1.58E-01
ტვინი	ცერებრელი	4.29E+01	3.03E+00
ტვინი (რუხი ნივთიერება)	ტვინი (რუხი ნივთიერება)	4.70E+01	2.81E+00
ტვინი (თეთრი ნივთიერება)	ტვინი (თეთრი ნივთიერება)	3.48E+01	1.94E+00
მკერდის ცხიმი	მკერდის ცხიმი	4.90E+00	2.37E-01
სარძევე ჯირკვალი	ფარისებრი ჯირკვალი	5.54E+01	3.14E+00
ბრონქები	ტრაქეა	3.83E+01	2.27E+00
ბრონქების სანათური	ბრონქების სანათური	1.00E+00	0.00E+00
ხრტილი	ხრტილი	3.62E+01	2.83E+00
ცერებრელი	ცერებრელი	4.29E+01	3.03E+00
ცერებროსპინალური სითხე	ცერებროსპინალური სითხე	6.42E+01	4.81E+00
საშვილოსნოს ყელი	საშვილოსნოს ყელი	4.61E+01	2.69E+00
კომისურა წინა	ტვინი (თეთრი მატერია)	3.48E+01	1.94E+00
Commissura Posterior	ტვინი (თეთრი ნივთიერება)	3.48E+01	1.94E+00
შემაერთებელი ქსოვილი	მეცხისლიგამენტი	4.08E+01	2.86E+00
დიაფრაგმა	კუნთები	5.12E+01	2.74E+00
Ductus Deferens	სისხლძარღვის კედელი	4.10E+01	2.35E+00
დურა	დურა	4.05E+01	2.51E+00
ეპიდერმისი	სათესლე ჯირკვალი	5.56E+01	3.35E+00
საყლაპავი მილი	კუჭი	6.01E+01	3.49E+00
საყლაპავის სანათური	საყლაპავის სანათური	1.00E+00	0.00E+00
უჯრედგარე სითხეები	ცერებროსპინალური სითხე	6.42E+01	4.81E+00
თვალი (წყლიანი)	ცერებროსპინალური სითხე	6.42E+01	4.81E+00
თვალი (ქოროიდი)	სისხლი	5.62E+01	3.79E+00

თვალი (ცილაური სხეული)	კუნთი	5.12E+01	2.74E+00
თვალი (რქოვანა)	თვალი (რქოვანა)	4.97E+01	3.36E+00
თვალი	კუნთი	5.12E+01	2.74E+00
თვალი (ლინზა)	თვალი (ლინზა)	3.27E+01	1.83E+00
თვალი (ბადურა)	ტვინი (ნაცრისფერი მატერია)	4.70E+01	2.81E+00
თვალი (სკლერა)	თვალი (სკლერა)	5.09E+01	3.11E+00
თვალი (მინისებრი)	თვალი (მინისებრი)	6.72E+01	3.69E+00
თვალის ლინზა (ქერქი)	თვალის ლინზა (ქერქი)	4.32E+01	2.40E+00
თვალის ლინზა (ბირთვი)	თვალი (ლინზა)	3.27E+01	1.83E+00
ცხიმი	ცხიმი (საშუალო ინფილტრატი)	1.04E+01	4.53E-01
ცხიმი (საშუალო ინფილტრატი)	ცხიმი (საშუალო ინფილტრატი)	1.04E+01	4.53E-01
ცხიმი (არა ინფილტრატი)	ცხიმი (არა ინფილტრატი)	5.15E+00	1.66E-01
ნაღვლის ბუშტი	ნაღვლის ბუშტი	5.64E+01	3.16E+00
გულის სანათური	სისხლი	5.62E+01	3.79E+00
გულის კუნთი	გულის კუნთი	5.25E+01	3.41E+00
ჰიპოკამპი	ტვინი (რუხი ნივთიერება)	4.70E+01	2.81E+00
ჰიპოფიზი	ფარისებრი ჯირკვალი	5.54E+01	3.14E+00
ჰიპოთალამუსი	ტვინი (რუხი ნივთიერება)	4.70E+01	2.81E+00
ინტერვერტებრალური დისკი	ინტერვერტებრალური დისკი	3.80E+01	2.12E+00
თირკმელი	თირკმელი	5.03E+01	3.55E+00
თირკმელი (ქერქი)	თირკმელი	5.03E+01	3.55E+00
თირკმელი (მედულა)	თირკმელი	5.03E+01	3.55E+00
მსხვილი ნაწლავი	მსხვილი ნაწლავი	5.18E+01	3.16E+00

მსხვილი ნაწლავის სანათური	კუნთები	5.12E+01	2.74E+00
ხორხის	ხრტილი	3.62E+01	2.83E+00
ღვიძლი	ღვიძლი	4.11E+01	2.63E+00
ფილტვის	ფილტვი (გაბერილი)	1.97E+01	1.21E+00
ფილტვი	ფილტვი	4.66E+01	2.67E+00
ფილტვი (გაბერილი)	ფილტვი (გაბერილი)	1.97E+01	1.21E+00
ლიმფური	არცერთი	0.00E+00	0.00E+00
ლიმფოდი	მეზენქიმული ლიმფური კვანძი	7.73E+01	1.16E+00
ქვედა ყბა	ძვალი (კორტიკალური)	1.07E+01	6.59E-01
მედულა გრძელვადიანი	ცერებრული	4.29E+01	3.03E+00
მენისკი	ხრტილი	3.62E+01	2.83E+00
შუა ტვინი	ცერებრული	4.29E+01	3.03E+00
ლორწოვანი გარსი	კუნთები	5.12E+01	2.74E+00
კუნთი	კუნთები	5.12E+01	2.74E+00
ნერვი	ნერვი	2.90E+01	1.68E+00
საკვერცხე	საკვერცხე	4.22E+01	3.27E+00
პანკრეასი	ფარისებრი ჯირკვალი	5.54E+01	3.14E+00
ფარინგი	ჰაერი	1.00E+00	0.00E+00
ფიჭვის სხეული	ფარისებრი ჯირკვალი	5.54E+01	3.14E+00
პლაცენტა	სისხლი	5.62E+01	3.79E+00
პონსი	ცერებრული	4.29E+01	3.03E+00
პროსტატი	სათესლე ჯირკვალი	5.56E+01	3.35E+00
SAT (კანკეშა ცხიმი)	ცხიმი (საშუალო ინფილტრატი)	1.04E+01	4.53E-01
სანერწყვე ჯირკვალი	სანერწყვე ჯირკვალი	7.33E+01	1.29E+00
სკალპი	კანი	3.68E+01	2.15E+00
სათესლე ბუშტუკი	სათესლე ჯირკვალი	5.56E+01	3.35E+00
კანი	კანი (მშრალი)	3.68E+01	2.15E+00

თავის ქალა	ძვალი (კორტიკალური)	1.07E+01	6.59E-01
თავის ქალა Cancellous	ძვლის სიმსივნური	1.72E+01	1.28E+00
თავის ქალა კორტიკალური	ძვალი (კორტიკალური)	1.07E+01	6.59E-01
წვრილი ნაწლავი	წვრილი ნაწლავი	5.21E+01	4.31E+00
წვრილი ნაწლავის სანათური	კუნთები	5.12E+01	2.74E+00
ზურგის ტვინი	ნერვი	2.90E+01	1.68E+00
ელენთა	ელენთა	5.03E+01	3.33E+00
კუჭი	კუჭი	6.01E+01	3.49E+00
კუჭის სანათური	კუნთი	5.12E+01	2.74E+00
მცესის/ლიგამენტი	მცესის/ლიგამენტი	4.08E+01	2.86E+00
თალამუსი	ტვინი (რუხი ნივთიერება)	4.70E+01	2.81E+00
თიმუსი	თიმუსი	5.01E+01	1.10E+00
ფარისებრი ჯირკვალი	ფარისებრი ჯირკვალი	5.54E+01	3.14E+00
ენა	ენა	5.09E+01	2.87E+00
კბილი	ძვალი (კორტიკალური)	1.07E+01	6.59E-01
კბილი (დენტინი)	ძვალი (კორტიკალური)	1.07E+01	6.59E-01
კბილი (მინანქარი)	ძვალი (კორტიკალური)	1.07E+01	6.59E-01
ტრაქეა	ტრაქეა	3.83E+01	2.27E+00
ტრაქეის სანათური	ტრაქეის სანათური	1.00E+00	0.00E+00
შარდსაწვეთი/ურეთრა	სისხლძარღვის კედელი	4.10E+01	2.35E+00
შარდის ბუშტის კედელი	შარდის ბუშტის კედელი	1.74E+01	1.06E+00
შარდი	შარდი	5.00E+01	1.75E+00
საშვილოსნო	საშვილოსნო	5.58E+01	3.44E+00
ხერხემალი	ძვალი (კორტიკალური)	1.07E+01	6.59E-01
წყალი		8.18E+01	3.04E+00

ცხრილი 4.1.2. ქსოვილის პარამეტრები 3700 მგ/კ სიხშირეზე.

4. 2. სითბური პროცესების კომპიუტერული მოდელირება ქალის მოდელისათვის

მობილური ტელეფონის ანტენის მიერ გამოსხივებული ელექტრომაგნიტური (ემ) ველი ურთიერთქმედებს ადამიანის თავზე და სხეულის სხვა ნაწილებზე, რამაც ზოგიერთ შემთხვევაში როგორც უკვე აღვნიშნეთ, შეიძლება გავლენა მოახდინოს ადამიანის ჯანმრთელობაზე (Razmadze 2009) (ნოზაძე 2018). ემ ველის ზეგავლენა უკუპროპორციულადაა დამოკიდებული მანძილზე ადამიანის თავსა და ხელს (ტელეფონთან ერთად) შორის. აღსანიშნავია ის, რომ მობილური ტელეფონით კომუნიკაციისას ემ ველის გამომსხივებელი ადამიანის მგრძნობიარე ქსოვილებთან უშუალო სიახლოვესაა.

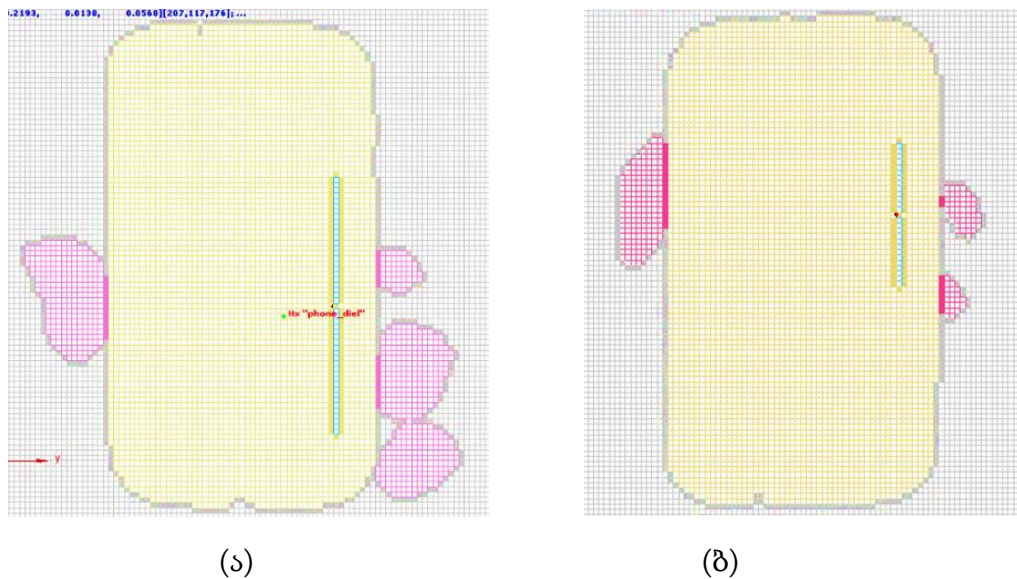
რიცხვითი ექსპერიმენტებისათვის გამოყენებული პროგრამული პაკეტით გვაქვს შესაძლებლობა თითოეული განხილული სცენარისათვის და სიხშირისათვის ვიპოვოთ S11 და აქედან გამომდინარე, შევაფასოთ მისი ცვლილება თავის და ხელის (თითების) პოზიციების გათვალისწინებისას. კვლევა ითვალისწინებს შემდეგი საკითხების შესწავლას:

- ✓ S11 (არეკვლის) კოეფიციენტის დამოკიდებულება სხვადასხვა პარამეტრებზე,
- ✓ SAR-ის და ემ ველის განაწილების დადგენა ახლო ზონაში სხვადასხვა სცენარებისთვის,
- ✓ ასევე, ამ სიდიდეების მნიშვნელობების დამოკიდებულება ანტენის შეთანხმებაზე თავისუფალ სივრცესთან.

მნიშვნელოვანია, შევისწავლოთ რა გავლენას ახდენს თავის და ხელის (თითების) ურთიერთპოზიცია ანტენის შეთანხმებაზე (Nozadze 2022). ამ ინფორმაციის ფლობა საშუალებას მოგვცემს თავიდან ავირიდოთ მაღალი მნიშვნელობის რეაქტიული ველის წარმოქმნა, მაღალი მნიშვნელობის SAR ქსოვილებში და მათთან დაკავშირებული შესაძლო უარყოფითი შედეგები.

აღსანიშნავია, რომ ყველა მომზადებული პროექტისთვის თვლის დრო საშუალოდ არის ორი საათი და დამოკიდებულია განხილულ სცენარზე (შემთხვევაზე), რომელსაც განვიხილავთ, ასევე არსებულ კომპიუტერულ რესურსზე.

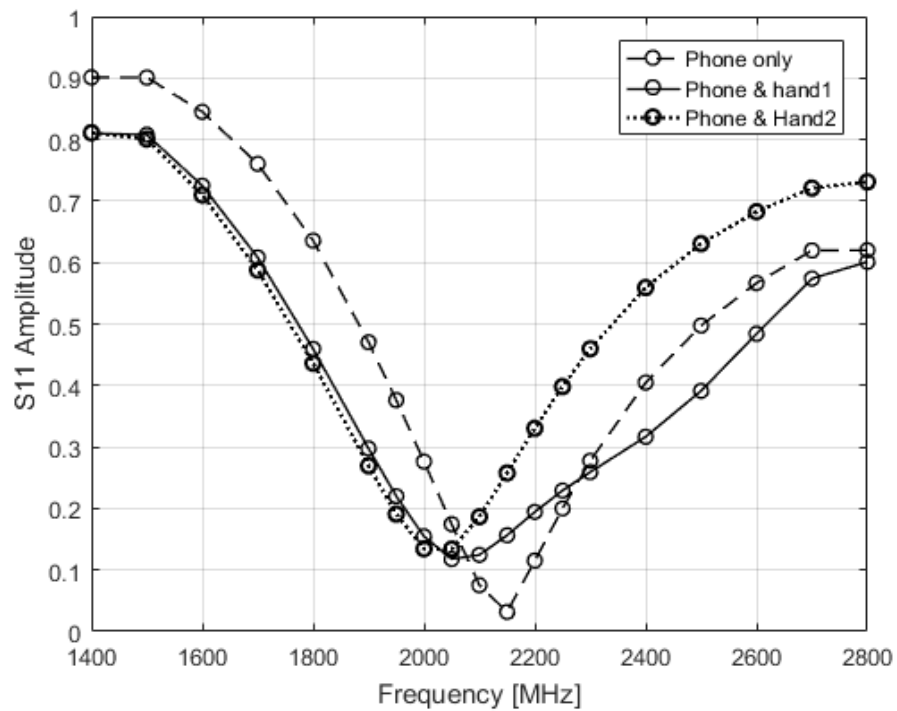
თვლის დრო მერყეობს 30 წუთიდან 12 საათამდე ჩვენს მიერ განხილული შემთხვევისთვის.



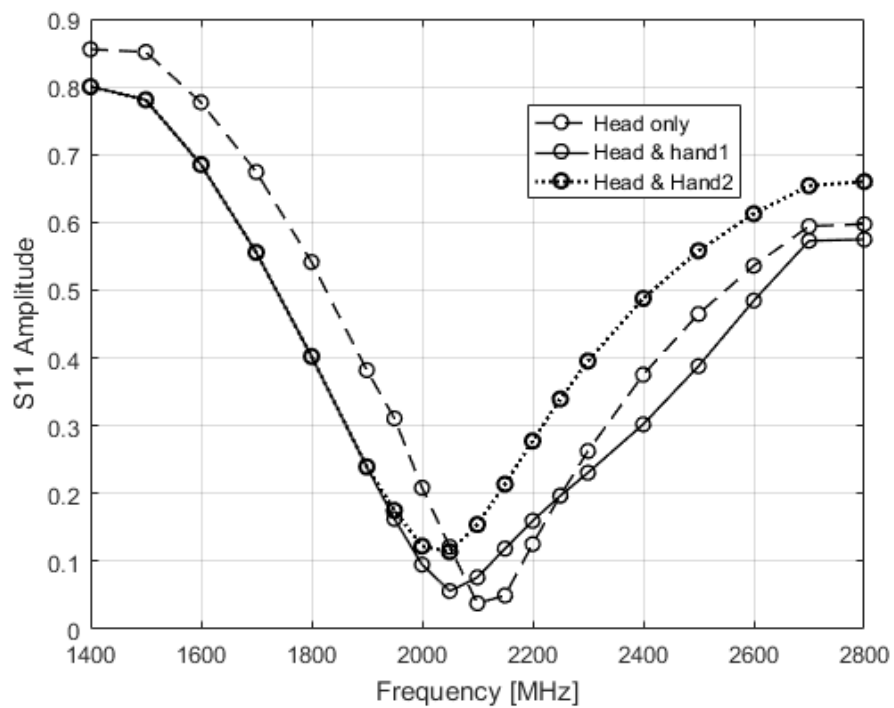
სურათი 4.2.1. ტელეფონის მოდელი დიპოლური ანტენით: ა) 2100 მგჰც და ბ) 3700მგჰც სიხშირეებისათვის.

კვლევა ჩატარდა ზრდასრული ადამიანის თავის მოდელზე მობილური ტელეფონის დაჭერის რეალისტური პოზიციებისათვის. კერძოდ, ხელის ორი პოზიციის გათვალისწინებით (სურ. 4.1.4.), როცა ტელეფონი არის დაჭერილი თავიდან სხვადასხვა დაშორებებით/მანძილებზე - 1მმ; 10მმ; 20მმ, გვიჩირავს მხოლოდ თითებით- **hand 1** და **hand 2**- დაჭერია ისე, რომ ეხება ხელისგულს, გამოსხივების 2100მგჰც და 3700მგჰც სიხშირეებზე (Nozadze 2022), (ქურციკიძე 2022). ტელეფონის ანტენად აღებულია დიპოლური ანტენა, მისი სიგრძე თითოეულ სიხშირეებზე შეირჩა ისე, რომ არეკვლის კოეფიციენტი - S11 ყოფილიყო მინიმალური მნიშვნელობის. (სურ. 4.2.1.), ეს კი თავისუფალ სივრცესთან ანტენის საუკეთესოდ შეთანხმებას შეესაბამება (ჯელაძე... 2015), (Nozadze 2022).

2100მგჰც სიხშირისათვის L - დიპოლის სიგრძე 48 მმ-იყო, ხოლო მინიმალური S11 ტოლია 0.08-ის. 3700მგჰც-ზე დიპოლის სიგრძე- L არის 26 მმ და S11 ტოლია 0.0842-ის (ნოზაძე 2018).

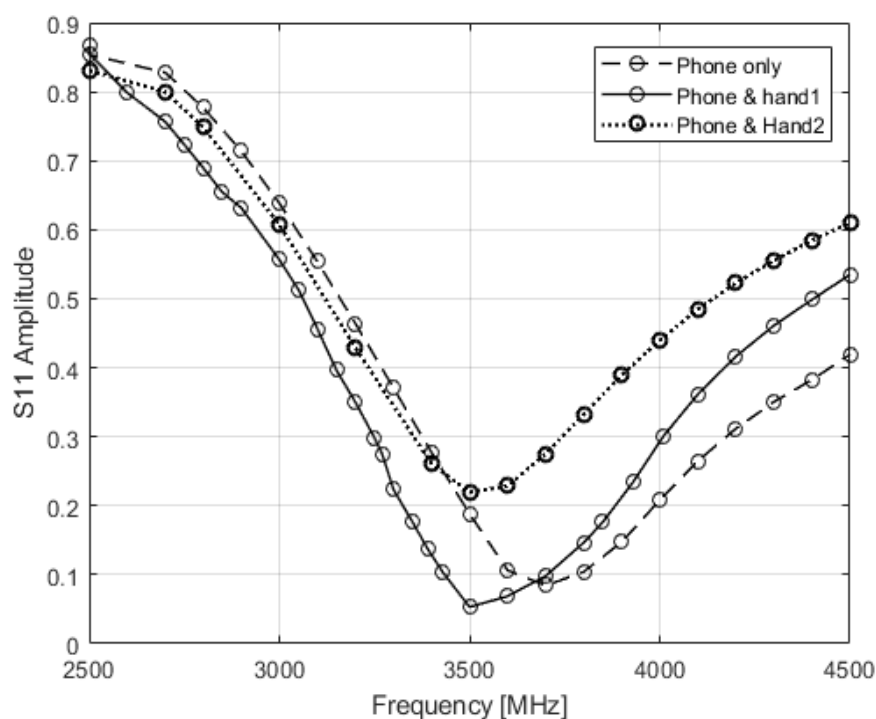


(ა)

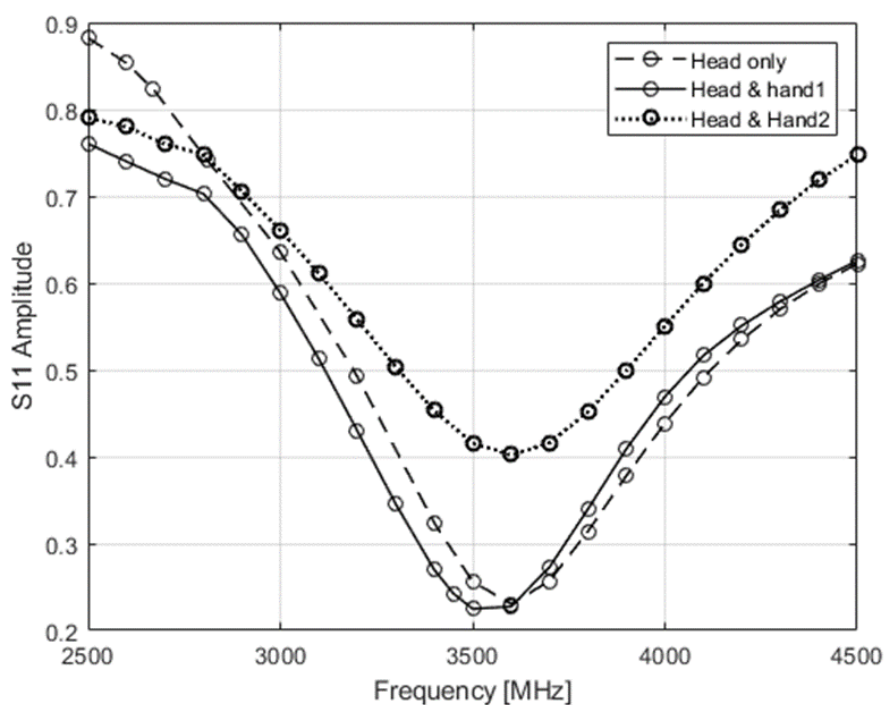


(ბ)

სურათი 4.2.2. სიხშირული მახასიათებელი დიპოლური ანტენისათვის: ა) ტელეფონი -ხელი; ბ) თავის მოდელი-ხელი სისტემა (2100 მგჰც სიხშირე).



(ა)

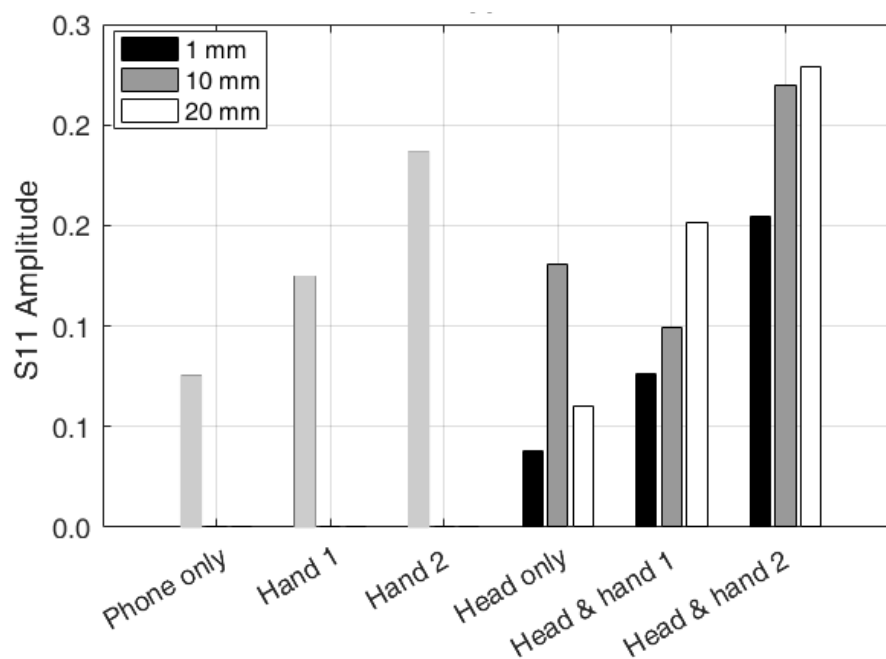


(ბ)

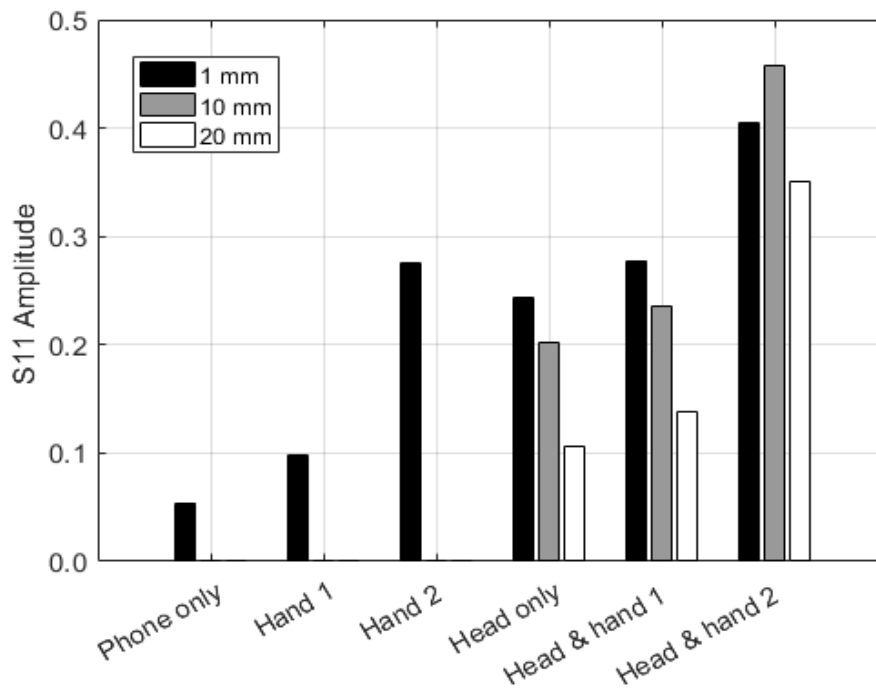
სურათი 4.2.3. სიხშირული მახასიათებელი დიპოლური ანტენისათვის: ა) ტელეფონი -ხელი; ბ) თავის მოდელი-ხელი სისტემა (3700 მგჰც სიხშირე).

მიღებულმა შედეგებით გამოჩნდა, რომ განხილულ შემთხვევებში, რიცხვით ექსპერიმენტებში თავის და ხელის ზეგავლენის გათვალისწინებისას ხდება S11

კოეფიციენტის მნიშვნელობის ზრდა. ამასთანავე, (ა)-შემთხვევაში ანტენა „თავი-ხელი-ტელეფონი“ კონფიგურაციის დროს უფრო კარგადაა თავისუფალ სივრცესთან შეთანხმებული, ვიდრე დიპოლურ ანტენას მხოლოდ, ოდონდ შედარებით წანაცვებულ სიხშირეზე (Kurtsikidze 2023), (Nozadze 2022). შემდგომ ხელის სხვადასხვა პოზიციისათვის და ასევე, თავის ზემოქმედების გათვალისწინებით, შევისწავლეთ S11-კოეფიციენტის ცვლილება, შედეგები ნაჩვენებია სურ. 4.2.2. და სურ. 4.2.3.



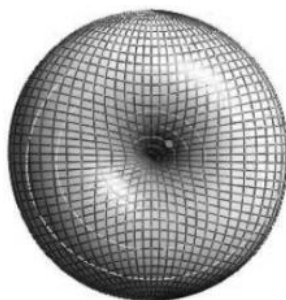
(ა)



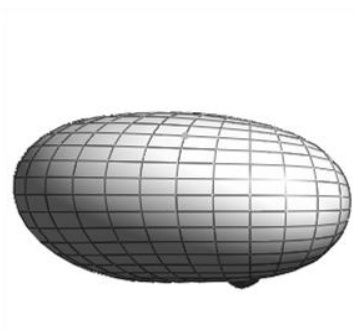
(ბ)

სურათი 4.2.4. ადამიანის მოდელისათვის მნიშვნელობები S11-კოეფიციენტის 'თავი-ანტენა-ხელი' კონფიგურაციისას: ა) 2100 და ბ) 3700 (მგჰც) სიხშირეებზე.

ვხდავთ, რომ თუ ტელეფონის ანტენას ფარავს ხელის გული - hand 2 შედარებით ცუდი შეთანხმება გამოვლინდება (თავის გათვალისწინების გარეშე და თავთან ერთად) ორივე 2100მგჰც და 3700მგჰც სიხშირეზე, იმ შემთხვევასთან შედარებით, თუ ტელეფონი დაჭერილი არის ხელის თითებით - hand 1.



(ა)

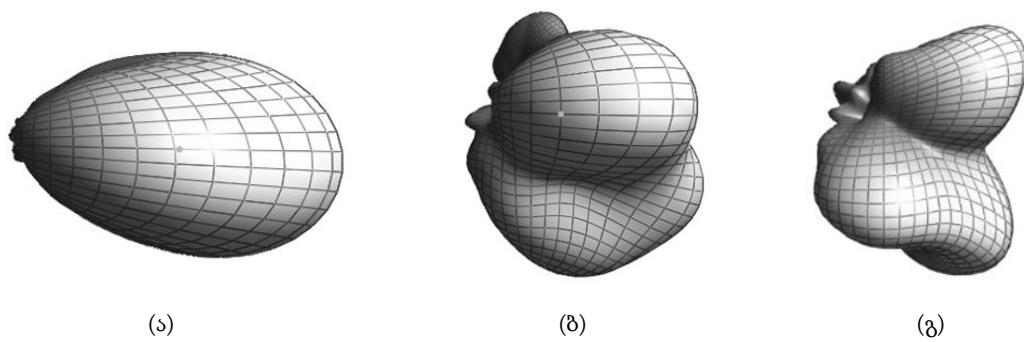


(ბ)

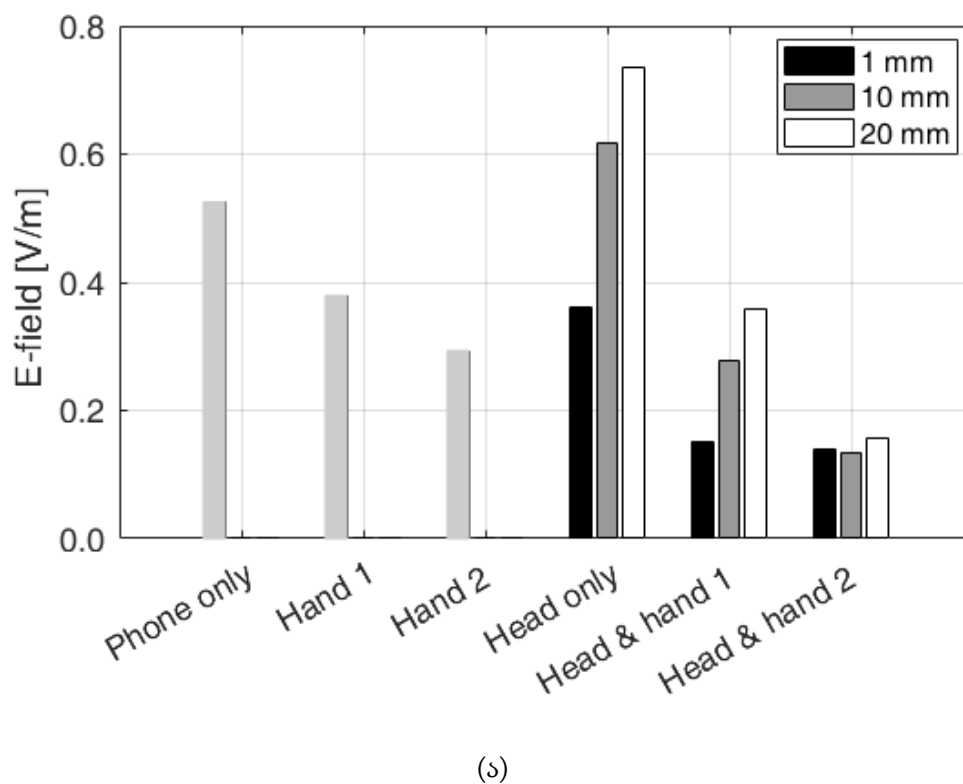


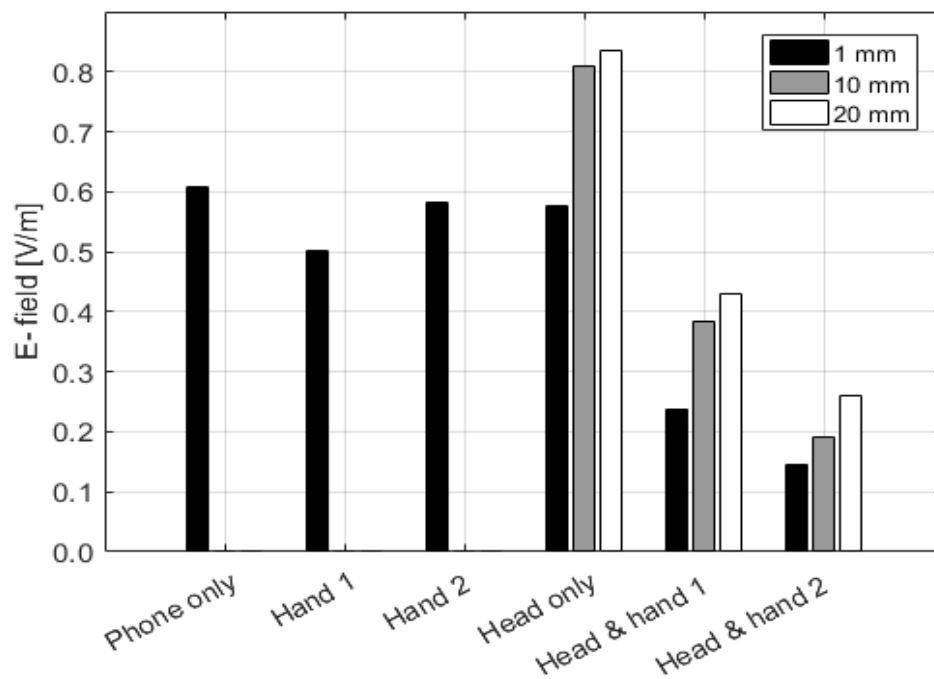
(გ)

სურათი 4.2.5. შორი ველის დიაგრამა: ა) ტელეფონი მხოლოდ; ბ) Hand 1, გ) Hand 2 (2100 მგჰც სიხშირე).



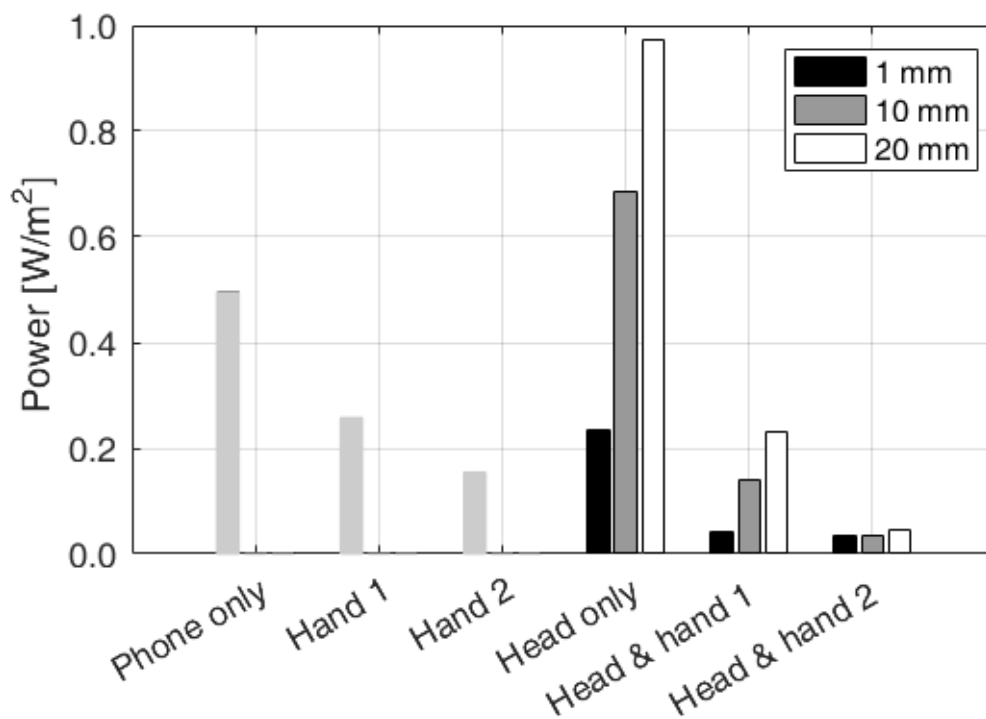
სურათი 4.2.6. შორი ველის დიაგრამა თავის ზემოქმედების გათვალისწინებით: ა) თავი მხოლოდ ტელეფონთან ერთად; ბ) Hand 1, გ) Hand 2 (2100 მგჰც სიხშირე).



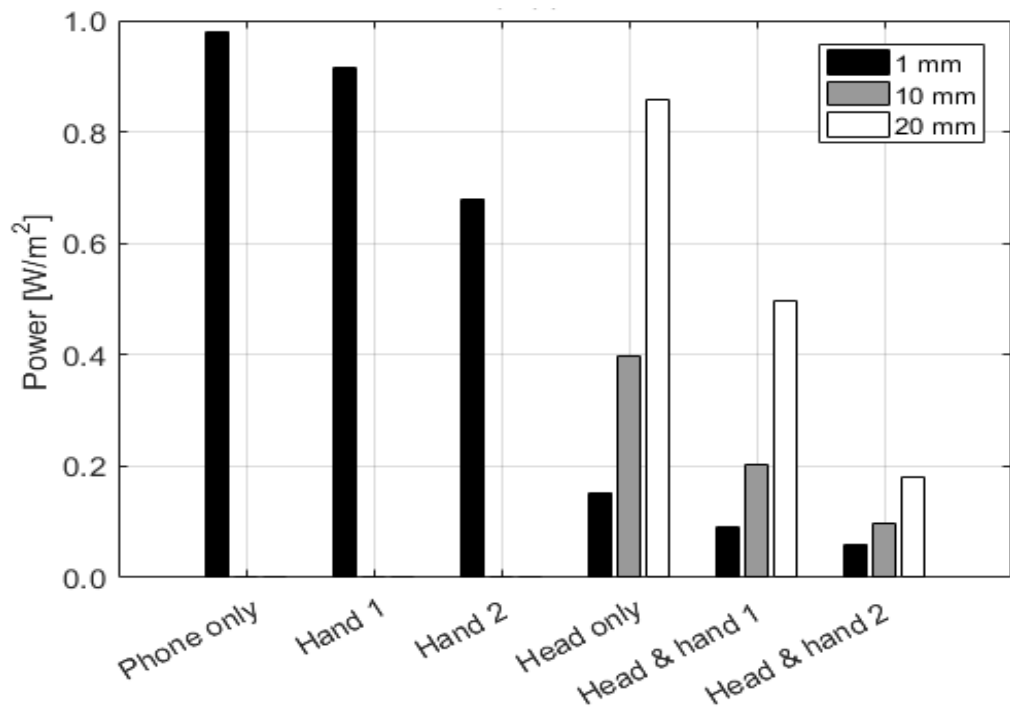


(ბ)

სურათი 4.2.7. დიპოლური ანტენის სხვადასხვა დაშორებებისათვის, თავი-ანტენა-ხელი კონფიგურაციისას ემ ველის მნიშვნელობები: ა) 2100 მგჰც, ბ) 3700 მგჰც სიხშირეებზე.



(ა)

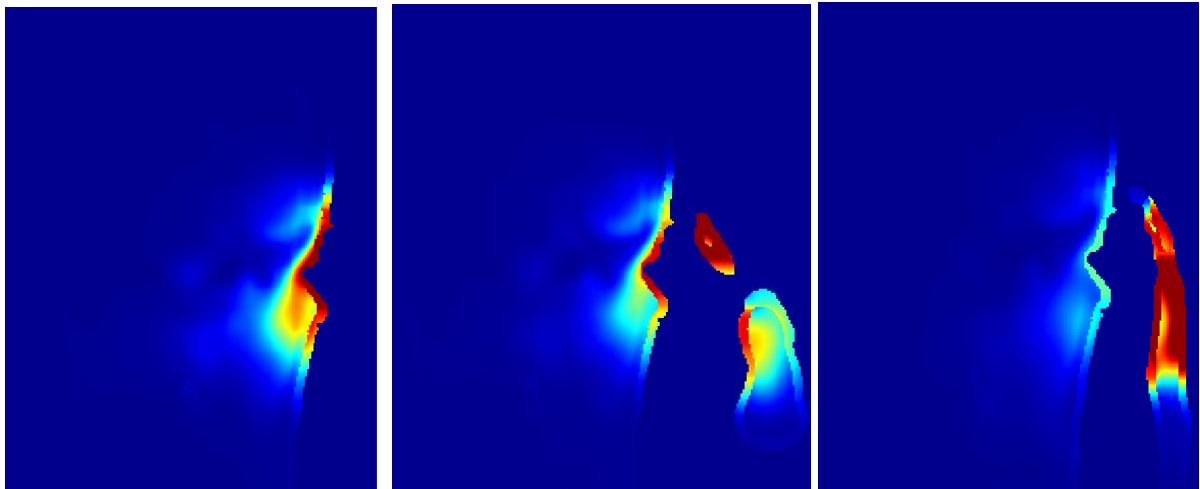


(ბ)

სურათი 4.2.8. თავი-ანტენა-ხელი კონფიგურაციისას სრული გადასხივებული სიმძლავრის მნიშვნელობები: ა) 2100 მგჰც და ბ) 3700 მგჰც სიხშირეებზე , ნორმირებულია 1ვატ-სიმძლავრეზე.

სტრუქტურა ემ ველის მნიშვნელოვნად დამოკიდებული არის განხილული მოდელის გეომეტრიაზე. როგორც მიღებული შედეგებიდან ვხედავთ (**სურ 4.2.5 - სურ 4.2.8**), ანტენის უშუალო სიახლოვეს ემ ველის მაღალი მნიშვნელობა მიიღება. ნაწილი გამოსხივებული ენერგიისა შთაინთქმება ქსოვილების მიერ, აღნიშნული ზემოქმედებს S11-კოეფიციენტზე. მობილური ტელეფონისათვის შორი ველის 3-განზომილებიანი დიაგრამები (თავის გარეშეშემთხვევისათვის) თავისუფალ სივრცეში და ტელეფონისათვის მხოლოდ ხელის ორივე პოზიციის გათვალისწინებით 2100 მგჰც სიხშირეზე ნაჩვენებია **სურ 4.2.5-ზე**; ხოლო თუ ვითვალისწინებთ თავის ზემოქმედებას **სურ 4.2.6-ზე**. მივიღეთ რომ ფიქსირებული გაძლიერების კოეფიციენტისათვის, გამოსხივების დიაგრამა და სრული გადასხივებული სიმძლავრე მნიშვნელოვნად არის დამოკიდებული მოდელირების სცენარზე (Kurtsikidze 2023) ნაჩვენებია, რომ ხელის და თავის ზემოქმედების გათვალისწინება გამოსხივების დიაგრამას ცვლის და ასევე, გამოსხივების სიმძლავრეს

(Keshvari 2012), თუ ტელეფონი არის დაჭერილი თავთან ახლოს და ფარავს ხელი -hand 2, ამ შემთხვევისათვის სრული გადასხივებული სიმძლავრე მნიშვნელოვნად მცირდება, იმ შემთხვევასთან შედარებით, როდესაც ტელეფონი დაჭერილია თითებით მხოლოდ -hand 1 (Kurtsikidze 2023), (Nozadze 2022).

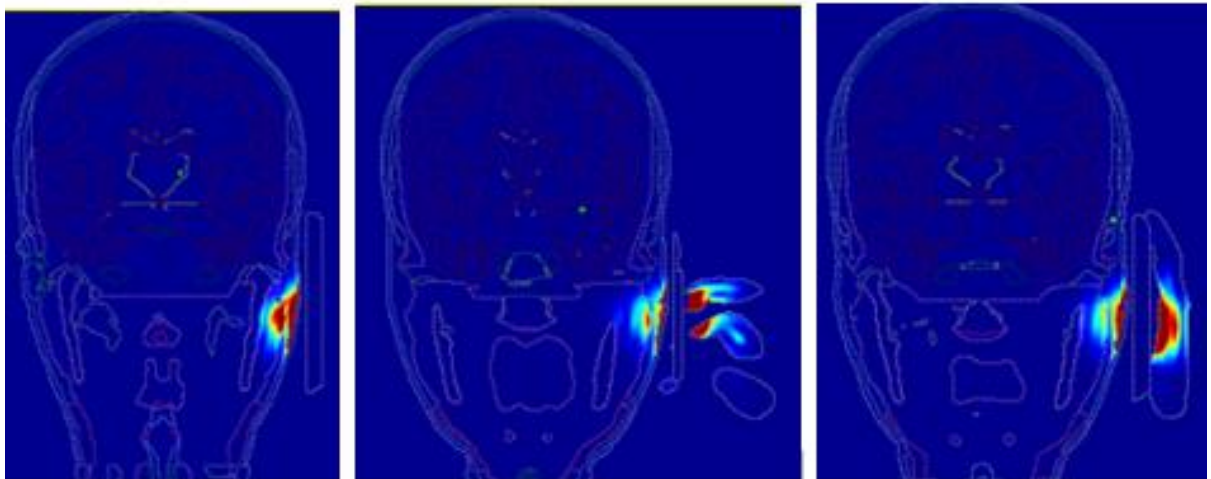


ადამიანის თავის, ხელის მოდელებში SAR განაწილება - (2100 მგჰც სიხშირე)

(ა)

(ბ)

(გ)



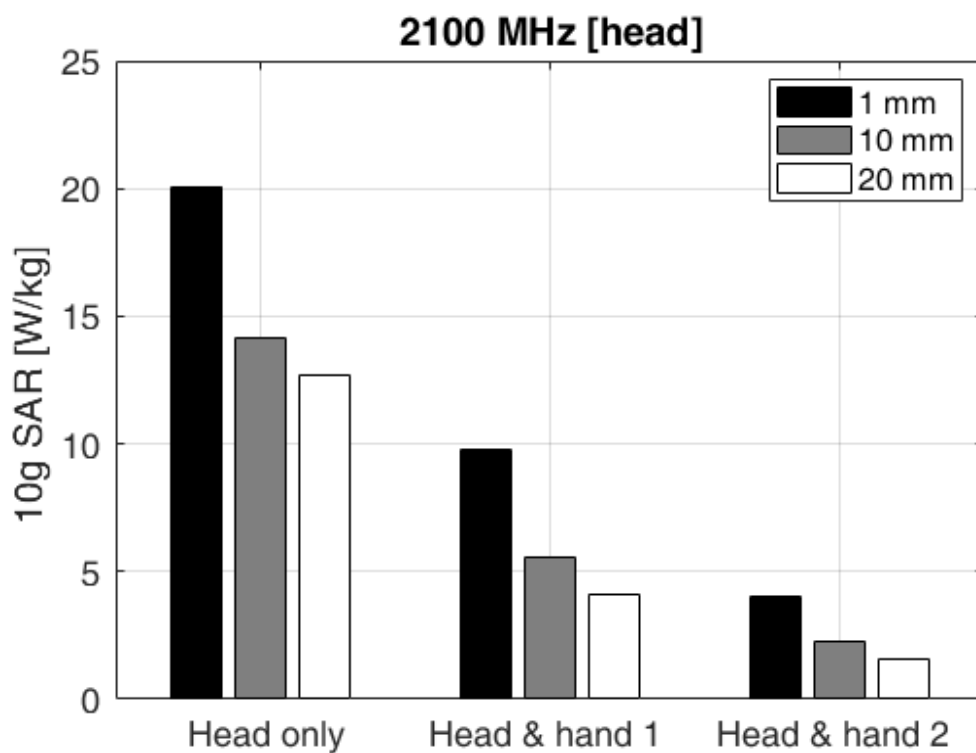
ადამიანის თავის, ხელის მოდელებში SAR განაწილება (3700 მგჰც სიხშირე):

(ა)

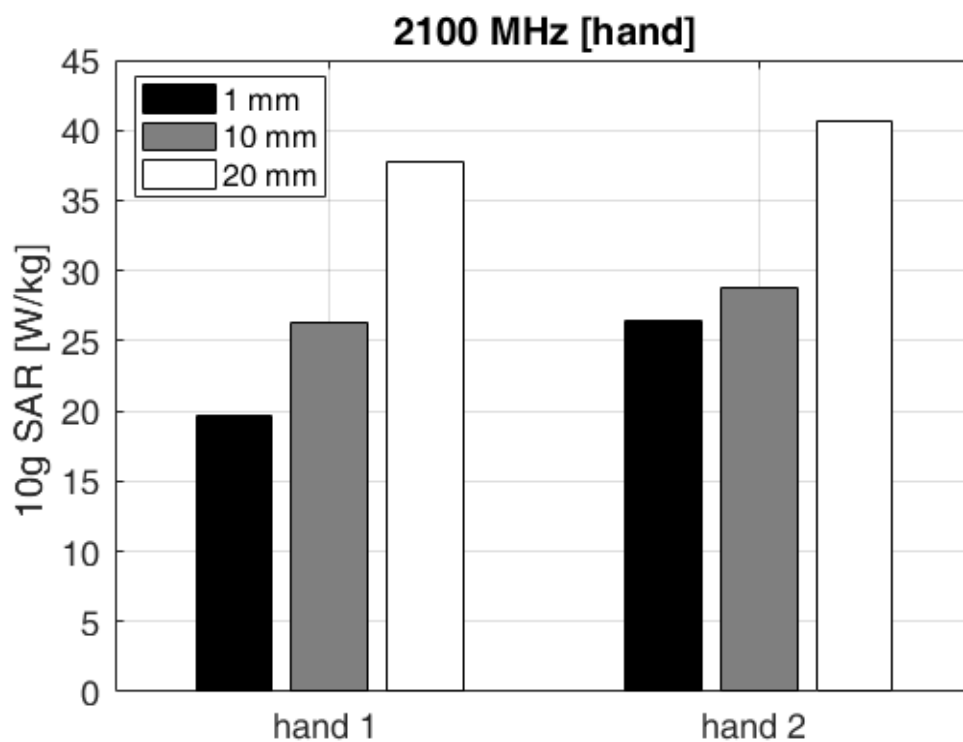
(ბ)

(გ)

სურათი 4.2.9. ადამიანის თავის, ხელის მოდელებში SAR განაწილება: ა) მხოლოდ თავი; ბ) ხელით Hand 1; გ) ხელით Hand 2 (2100 მგჰც და 3700 მგჰც სიხშირეები).

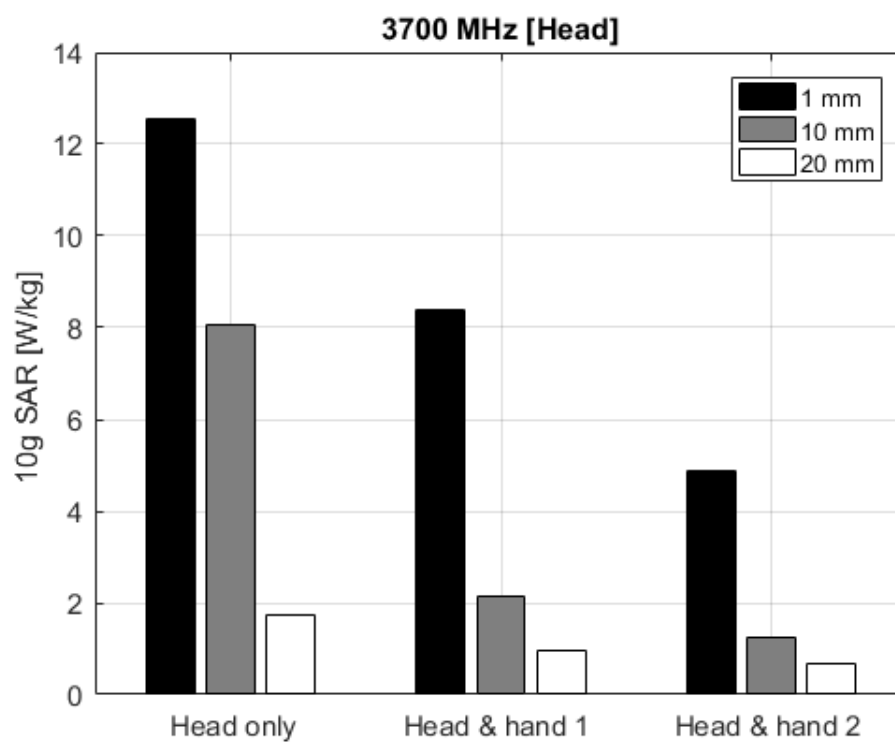


(ა)

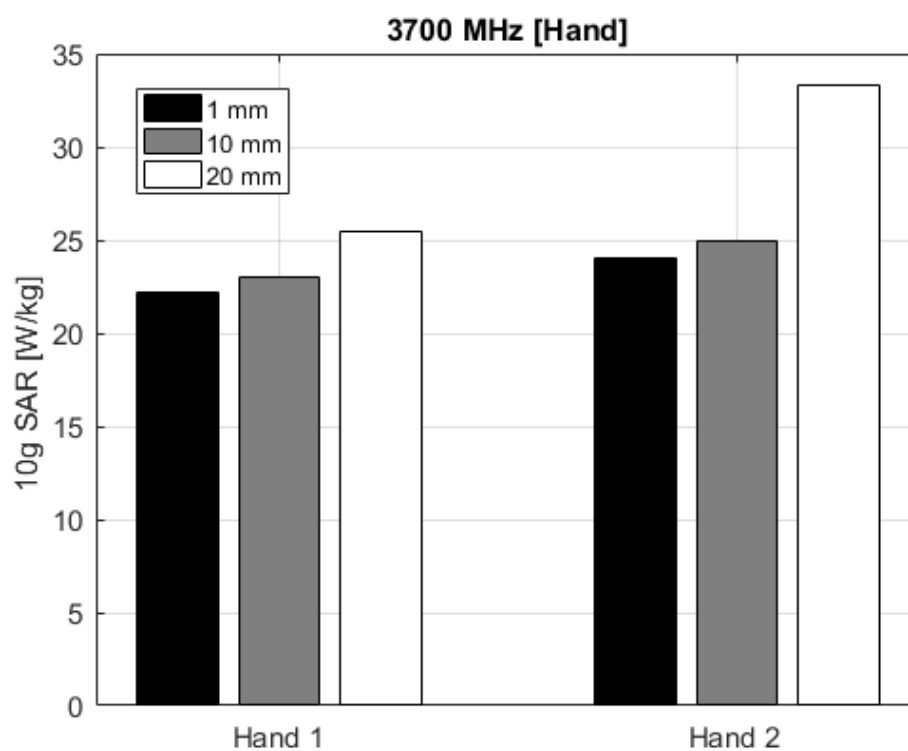


(ბ)

სურათი 4.2.10. 10გSAR მნიშვნელობები: ა) თავის მოდელში; ბ) ხელის ქსოვილებში (2100 მგჰც სიხშირეზე; SAR- ნორმირებულია 1ვატ სიმძლავრეზე).



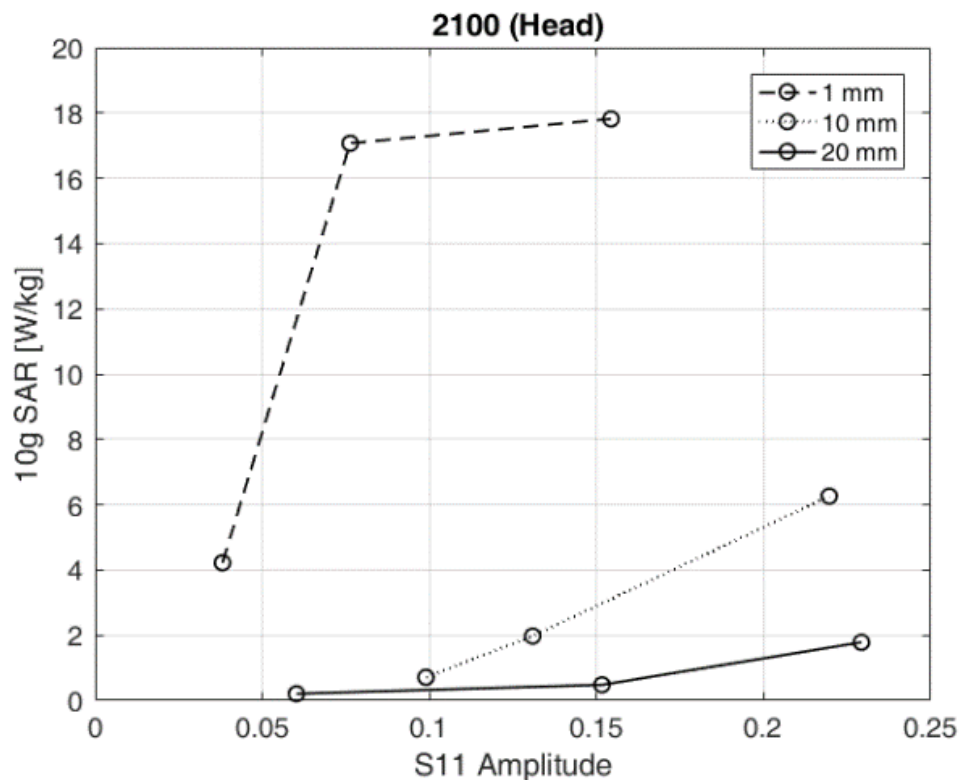
(ა)



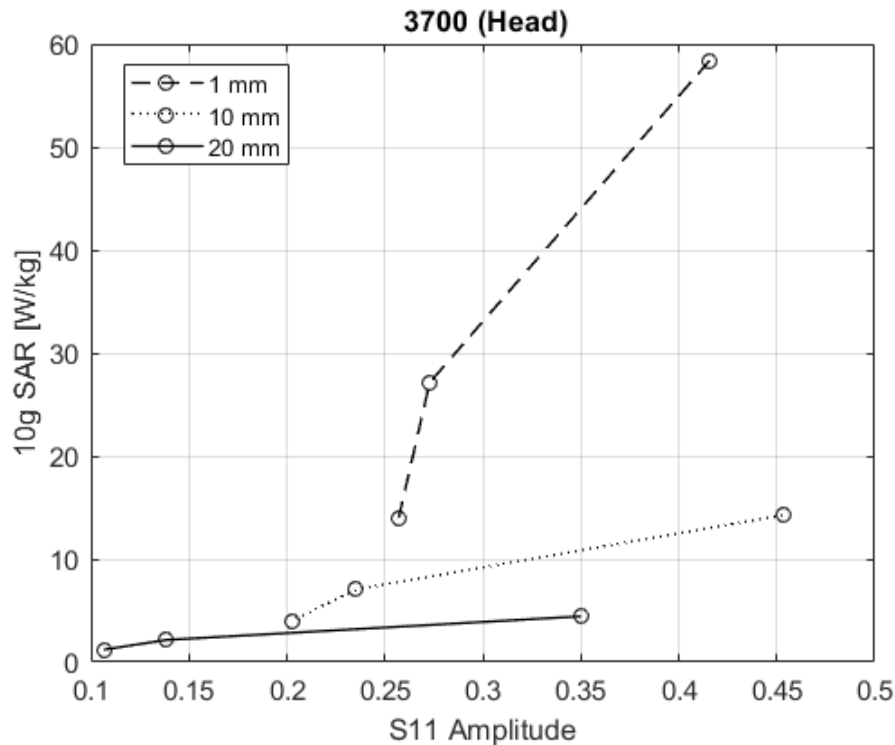
(ბ)

სურათი 4.2.11. 10გSAR მნიშვნელობები: ა) თავის მოდელში; ბ) ხელის ქსოვილებში (3700 მგჰც სიხშირეზე; SAR-ნორმირებულია 1ვატ სიმძლავრეზე).

როდესაც ხელის ზეგავლენა გათვალისწინებულია (სურ 4.2.9.), პიკური მნიშვნელობა SAR-ის მიიღება ხელში; რამდენადაც, ემ ველის ენერგიის მეტი ნაწილი ხელის მიერ შთანთქმება და ამის შედეგად, თავში პიკური მნიშვნელობა SAR-ის ძალზედ შემცირებულია; რაც სურ 4.2.10. და სურ 4.2.11. -დან კარგად ჩანს. 10გSAR-ის მნიშვნელობები პროპორციული არის სიხშირისა და უკუპროპორციული თავსა და მობილურ ტელეფონს შორის მანძილის. 10გSAR მცირდება მანძილის ზრდასთან ერთად თავსა და მობილურ ტელეფონს შორის (Nozadze 2022) თავის ქსოვილებში SAR-პიკური მნიშვნელობები არის შემცირებული, თუ გათვალისწინებულია ხელის ზეგავლენა; როდესაც ტელეფონის ანტენას ფარავს ხელის გული-**hand 2**, თავში პიკური მნიშვნელობა SAR-ის მცირეა იმ შემთხვევასთან შედარებით, როდესაც ტელეფონი გვიჭირავს ხელის თითებით- **hand 1**. ეს აიხსნება იმით, რომ გამოსხივებული ენერგიის მეტი წილი შთანთქმულია ხელის გულში და მცირე ნაწილი მხოლოდ ენერგიის მიაღწევს ადამიანის თავამდე (ნოზაძე 2018), (Nozadze 2022), (Liu 2016, 739-746), (Naghdi 2016, 2452-2457).



(ა)



(ბ)

სურათი 4.2.12. 10გSAR-ის S11- ზე დამოკიდებულება: თავის მოდელისათვის ა) 2100 მგჰც, ბ) 3700 მგჰც სიხშირეებისათვის.

დამოკიდებულება SAR-ის პიკური მნიშვნელობებისა S11 კოეფიციენტზე (შეთანხმების პირობებზე) ნაჩვენებია **სურ 4.2.12.** SAR ნორმირებულია თავისუფალ სივრცეში ტელეფონის ემ ველის მნიშვნელობაზე (Liu 2016, 739-746), (ქურციკიძე 2022), (Nozadze 2022).

წარმოდგენილ თითოეულ გრაფიკზე:

- პირველი წერტილი თავში SARის მნიშვნელობას ხელის გარეშე შემთხვევას შეესაბამება,
- მეორე - ხელით-**hand 1**,
- ხოლო მესამე - ხელით **hand 2** - პოზიციით.

მნიშვნელობები 10გSAR-ის ანტენის შეთანხმებაზეა დამოკიდებული თავისუფალ სივრცესთან (S11 კოეფიციენტზე); ასევე, დაშორებაზე თავს და ტელეფონს შორის (Liu 2016, 739-746), წარმოდგენილი კვლევის შედეგებიდან ჩანს, რომ თავისუფალ სივრცესთან ტელეფონის ანტენის შეთანხმებაზე ზეგავლენას ახდენს

ურთიერთპოზიციები ტელეფონის და ხელის. ყოველივედან გამომდინარე, შეგვიძლია გამოვთქვათ ვარაუდი, რომ ადამიანის თავში და ხელში SAR -ის პიკური მნიშვნელობის ზრდის მიზეზი არის ცუდი შეთანხმება. ცხადია, რომ მნიშვნელოვნად დამოკიდებული არის მიღებული შედეგები იმაზე, თუ როგორ შევარჩევთ მოდელების პარამეტრებს. ხელში, რომლითაც დაჭერილია ტელეფონი, გამოსხივებული ენერგიის ნაწილი შთანთქმება; ამის გამო, კარგი კავშირის აღსადგენად საბაზო სადგურთან, სრული გადასხივებული სიმძლავრე ტელეფონის იზრდება. შედეგად, გვაქვს SAR-პიკური მნიშვნელობების ზრდა ადამიანის თავის მოდელში (Liu 2016, 739-746). ანტენის მახლობლად მდებარე დიელექტრიკული ობიექტი მნიშვნელოვნად მოქმედებს ანტენის შეთანხმებაზე (თავისუფალ სივრცესთან). რიგ შემთხვევაში სხვადასხვა პოზიცია ხელის ან თითების S11 კოეფიციენტს ამცირებს; გვაქვს კარგი შეთანხმება მცირედ გადანაცვლებულ/წანაცვლებულ სიხშირეებზე, თუ არ ვითვალისწინებთ ადამიანის თავს (Dhami 2015, 977-980). დადგენილია, რომ ახლო ზონაში ემ ველის მნიშვნელობები და შესაბამისად, SAR- პიკური მნიშვნელობა დამოკიდებულია ძლიერად - S11 პარამეტრზე/შეთანხმებაზე და თავი-ანტენა-ხელი სისტემის კონფიგურაციაზე. S11-ის მნიშვნელობის ზრდის შემთხვევაში, ორივე განხილული სიხშირეზე, SAR-ის მნიშვნელობები იზრდება ადამიანის თავში (ნოზაძე 2018), (Faruque 2015).

4.3. სითბური პროცესების კომპიუტერული მოდელირება

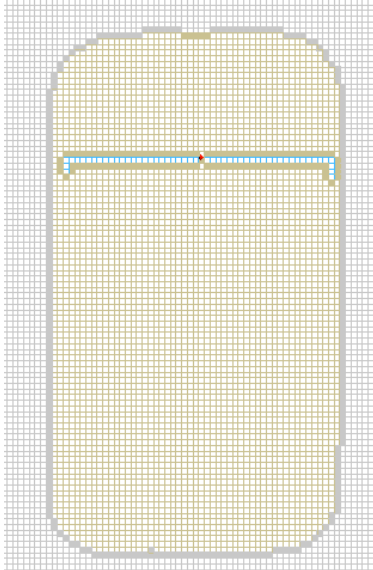
ბავშვის მოდელისათვის

რადგან მობილური ტელეფონები ფართოდ გავრცელებული საკომუნიკაციო მოწყობილობაა თანამედროვე მსოფლიოში, ამიტომ რელევანტურია განსაკუთრებული მღელვარება ბავშვების მიმართ. ბავშვები არ არიან მხოლოდ პატარა მოზრდილები; მათი განვითარებადი ტვინი და სხეული ცალსახად დაუცველია გარემოში არსებული ემ ველის და მათ შორის მობილური ტელეფონის გამოსხივების მიმართ. კორონავირუსის პანდემიის პერიოდში, უკაბელო ტექნოლოგია გახდა მთავარი გზა განათლებაზე წვდომისა. კერძოდ, ბავშვებისათვის ვირტუალურ კლასებში მონაწილეობისთვის მთელ მსოფლიოში. 2020 წელს გამოკითხვამ აჩვენა, რომ 2-დან 4 წლამდე ასაკის ბავშვების თითქმის ნახევარი და 5-დან 8 წლამდე ასაკის სამი ბავშვიდან ორი უკვე ფლობდა საკუთარ მობილურ მოწყობილობებს, პლანშეტს ან სმარტფონს.

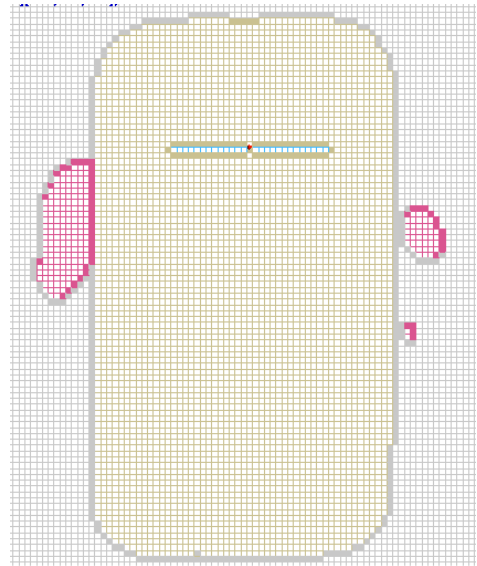
იმის გამო, რომ ტექნოლოგია უფრო მცირე ასაკის ბავშვების მიერ გამოიყენება, ვიდრე ოდესმე, კიდევ უფრო მნიშვნელოვანია გამოკვლეული იყოს წარმოადგენს თუ არა მობილური ტელეფონის გამოყენება ჯანმრთელობისთვის საშიშროებას.

აქედან გამომდინარე როგორც ზრდასრული ქალის შემთხვევაში, ანალოგიური კვლევა განხორციელდა ბავშვის მოდელისათვის. რათა შეფასდეს შესაძლო რისკები, რომელიც შესაძლოა გამოიწვიოს მობილური ტელეფონის მიერ გამოსხივებული ემ ველის ზემოქმედებამ ბავშვებზე. ამ შემთხვევაშიც, რიცხვითი ექსპერიმენტები ჩატარდა 2100 მგ/კ და 3700 მგ/კ სტანდარტულ სიხშირეებზე. განისაზღვრა SAR მნიშვნელობები (პიკური მნიშვნელობები), შორი ველის დიაგრამები ბავშვის ხელის ზეგავლენის გათვალისწინების გარეშე და ასევე, ხელის გათვალისწინების შემთხვევაში). ბავშვის ხელის ზომის სიმცირის გამო, მომზადდა ბავშვის მოდელისთვის ხელის ერთი პოზიცია. მობილური ტელეფონი (ხელთან ერთად) განთავსდა 1, 10, 20[მმ] მანძილებზე ბავშვის თავის მოდელიდან.

ტელეფონის ანტენად არჩეული იქნა დიპოლური ანტენა, განხილულ სიხშირეებზე ანტენის სიგრძე შერჩეული იქნა ისე, რომ S_{11} - იყოს მინიმალური (სურ. 4.3.1.), რაც გულიახმობს თავისუფალ სივრცესთან ანტენის საუკეთესო შეთანხმებას. 2100მგჰც სიხშირისათვის დიპოლის L -სიგრძე იყო 52 მმ, ხოლო მინიმალური S_{11} კი 0.08. 3700მგჰც-ის $L=26$ მმ-ია და S_{11} ტოლია 0.07.

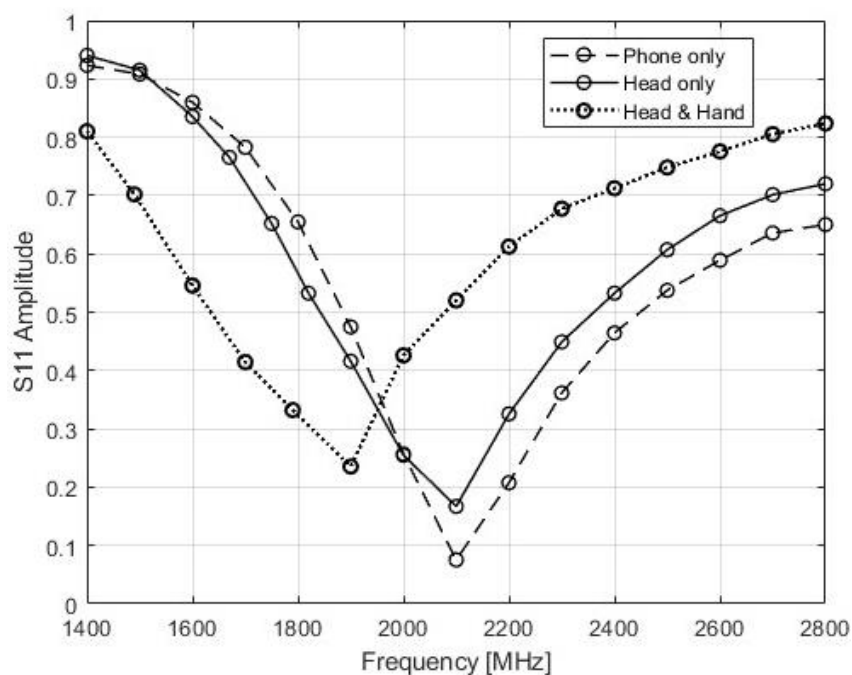


(ა)

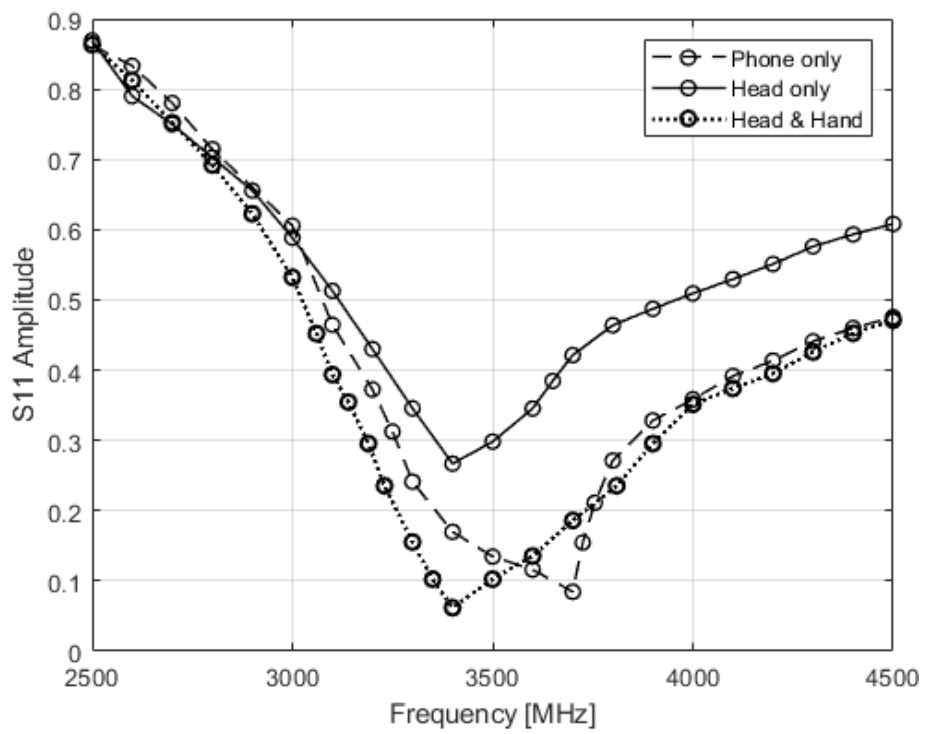


(ბ)

სურათი 4.3.1. მობილური ტელეფონის მოდელი დიპოლური ანტენით: ა) 2100 მგჰც და ბ) 3700მგჰც სიხშირეები.

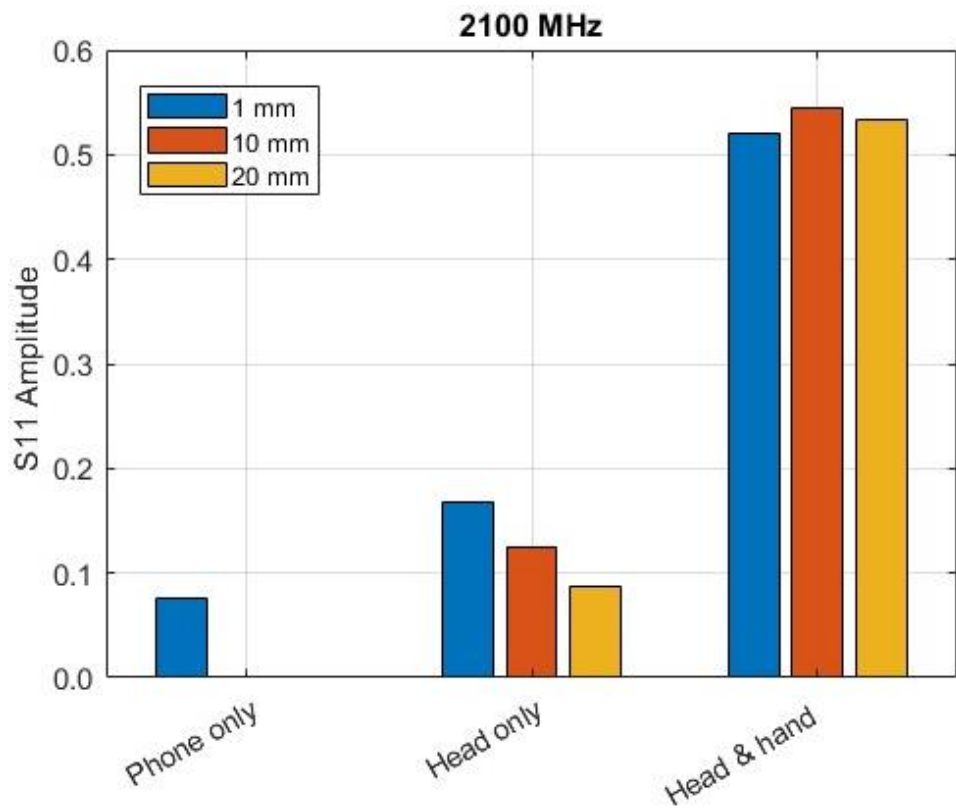


(ა)

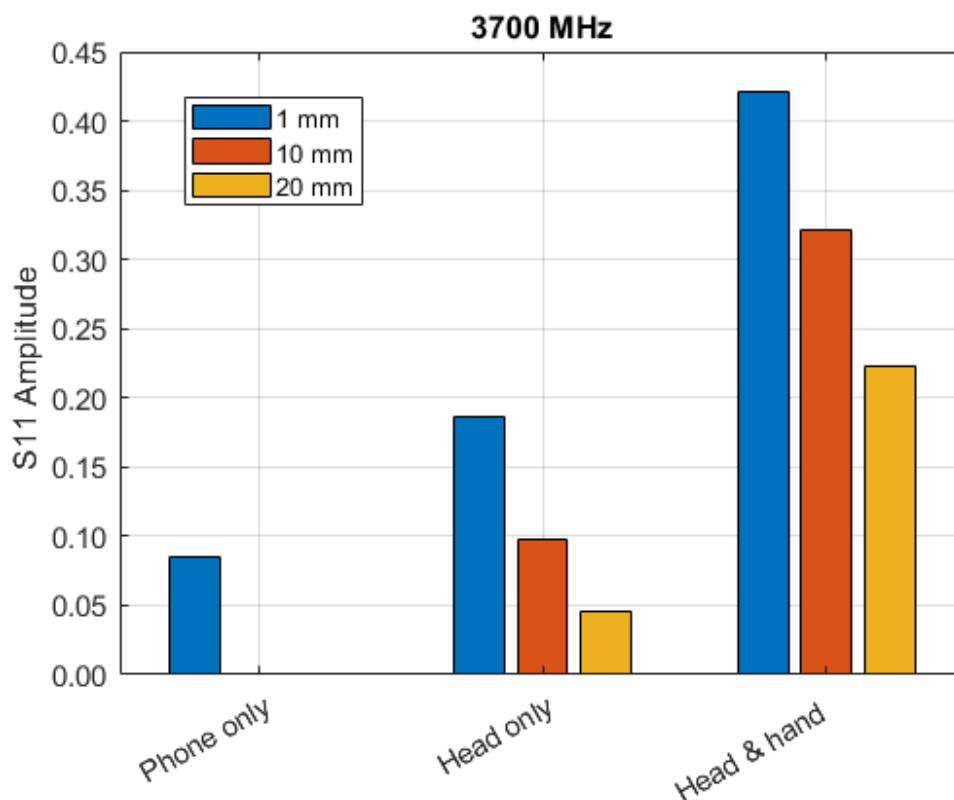


(ბ)

სურათი 4.3.2. დიპოლური ანტენის სიხშირული მახასიათებელი ა) 2100 მგჰც და ბ) 3700 მგჰც სიხშირეები.



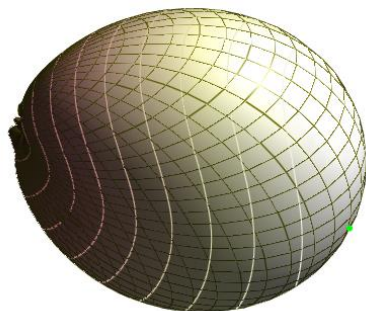
(ა)



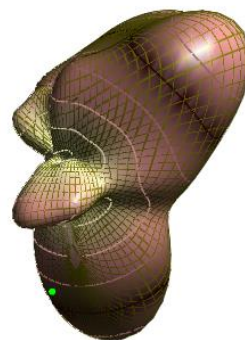
(ბ)

სურათი 4.3.3. S11-ის მნიშვნელობები „თავი-ანტენა-ხელი“ სისტემისათვის; ა) 2100მგჰც, ბ) 3700მგჰც სიხშირეები.

სურ. 4.3.2 - სურ. 4.3.3-დან ვხედავთ, რომ დიელექტრიკული ობიექტი მდებარე გამომსხივებელი ანტენის ახლო ზონაში, გავლენას ახდენს/ცვლის S11 კოეფიციენტის მნიშვნელობას. S11 პარამეტრის მნიშვნელობა არის დიდი, თუ ხელის და თავის ზეგავლენას ვითვალისწინებთ დასხივების პროცესში; ასევე, როცა თავს და ხელს შორის მანძილი, ტელეფონთან ერთად, მცირეა. ზოგიერთი შემთხვევაში აღმოჩნდა, რომ S11-არეკვლის კოეფიციენტის მნიშვნელობა არის მცირე, მაგრამ განსხვავებული სიხშირეებისათვის.

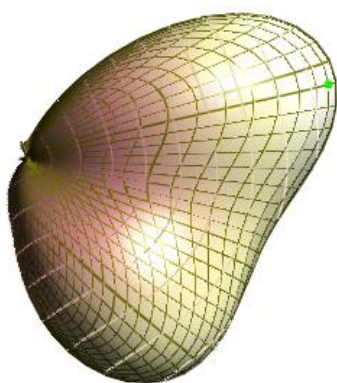


(ა)

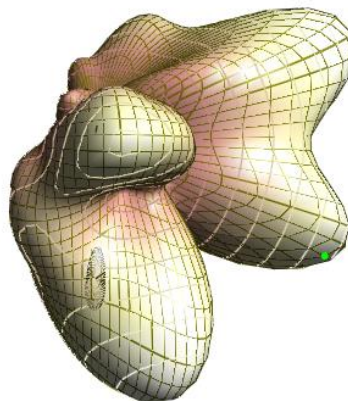


(ბ)

სურათი 4.3.4. ანტენის შორი ველის დიაგრამა: ა) ხელის გარეშე, ბ) ხელის გათვალისწინებით (თავთან ერთად 2100 მგჰც სიხშირეზე).

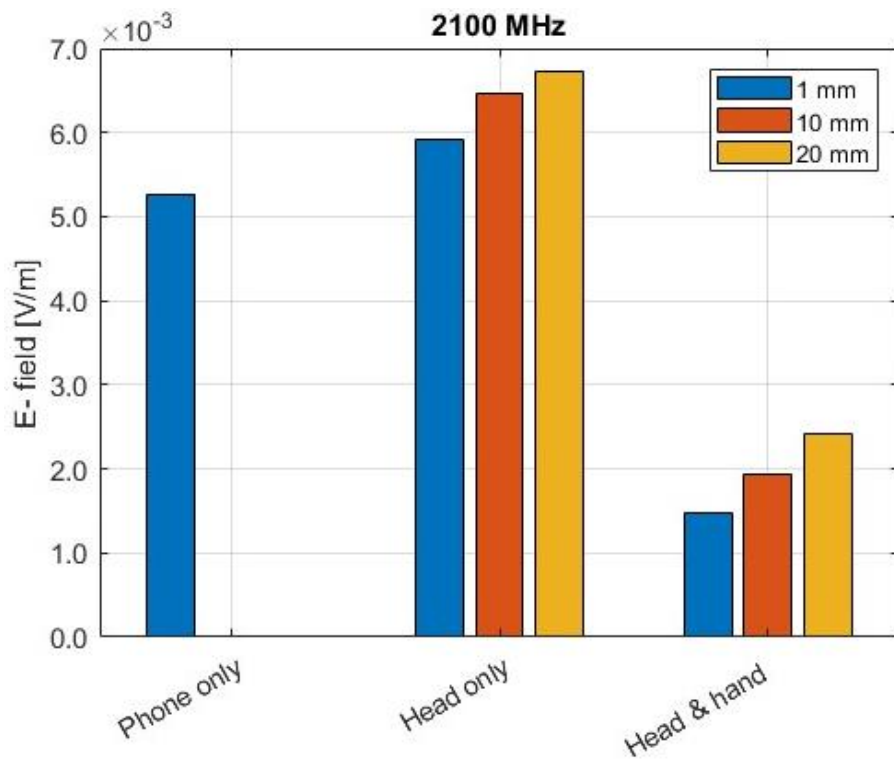


(ა)

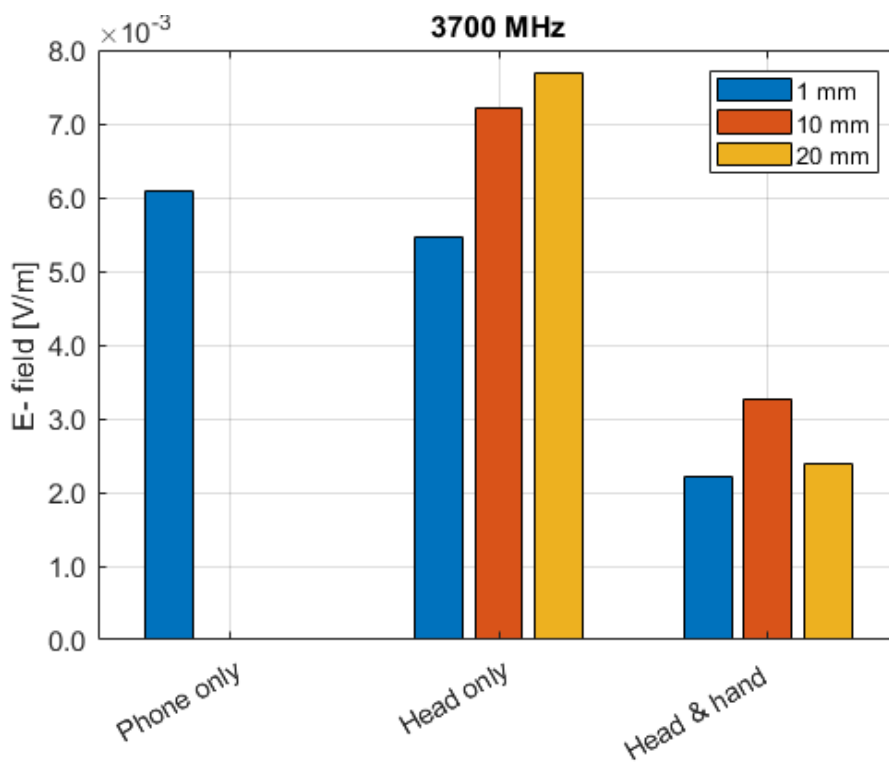


(ბ)

სურათი 4.3.5. ანტენის შორი ველის დიაგრამა: ა) ხელის გარეშე, ბ) ხელის გათვალისწინებით (თავთან ერთად 3700 მგჰც სიხშირეზე).

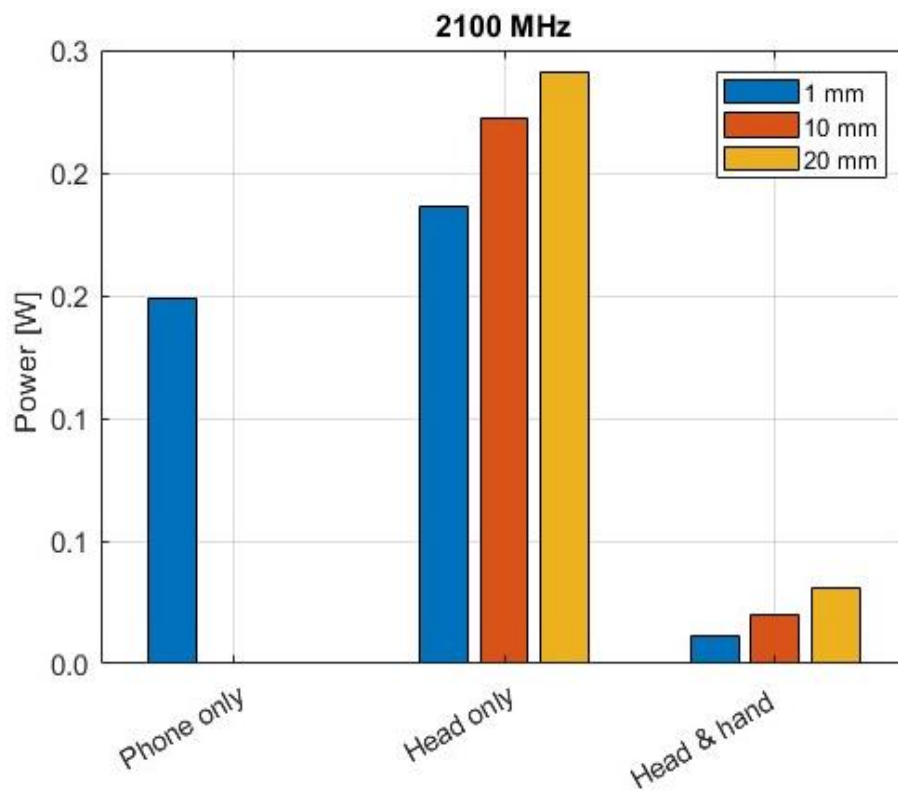


(ა)

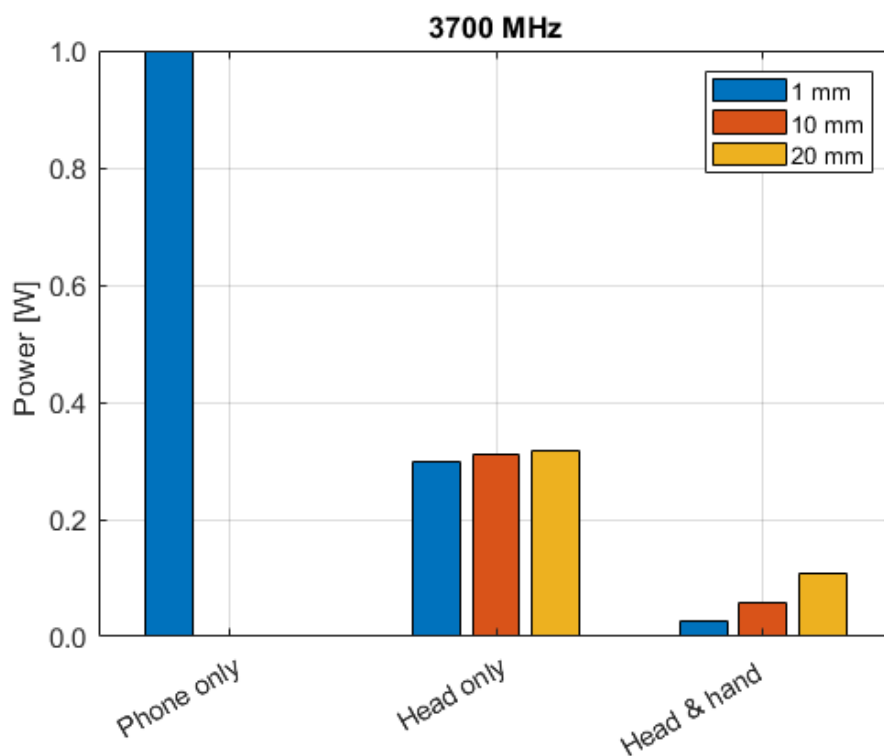


(ბ)

სურათი 4.3.6. თავი-ანტენა-ხელი სისტემისთვის ემ ველის მნიშვნელობები: ა) 2100მგჰც და ბ) 3700მგჰც სიხშირეებზე (დიპოლური ანტენის სხვადასხვა მდებარეობისთვის).



(ა)



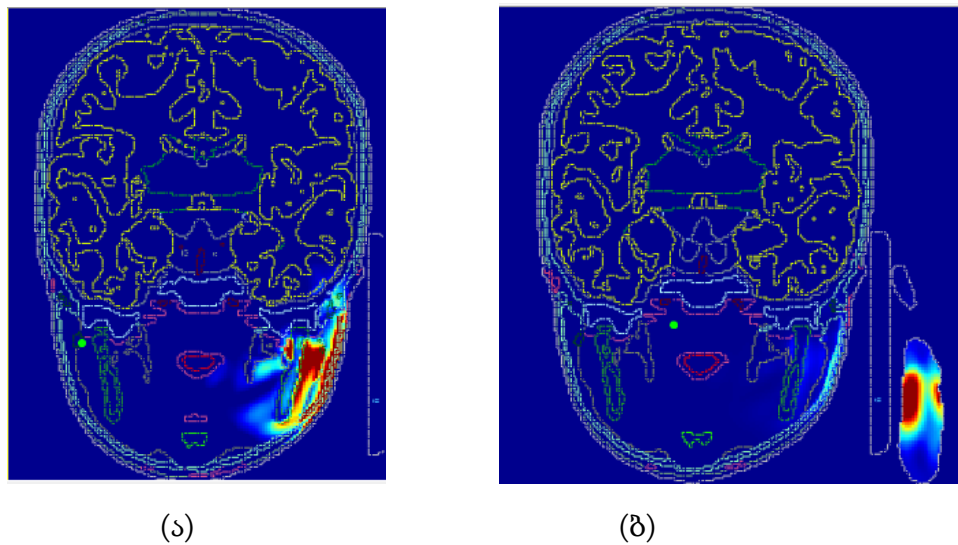
(ბ)

სურათი 4.3.7. თავი-ანტენა ხელი სისტემისთვის სრული გადასხივებული სიმძლავრის მნიშვნელობები: ა) 2100მგჰც და ბ) 3700მგჰც სიხშირეებზე; ნორმირებული არის 1ვატ სიმძლავრეზე.

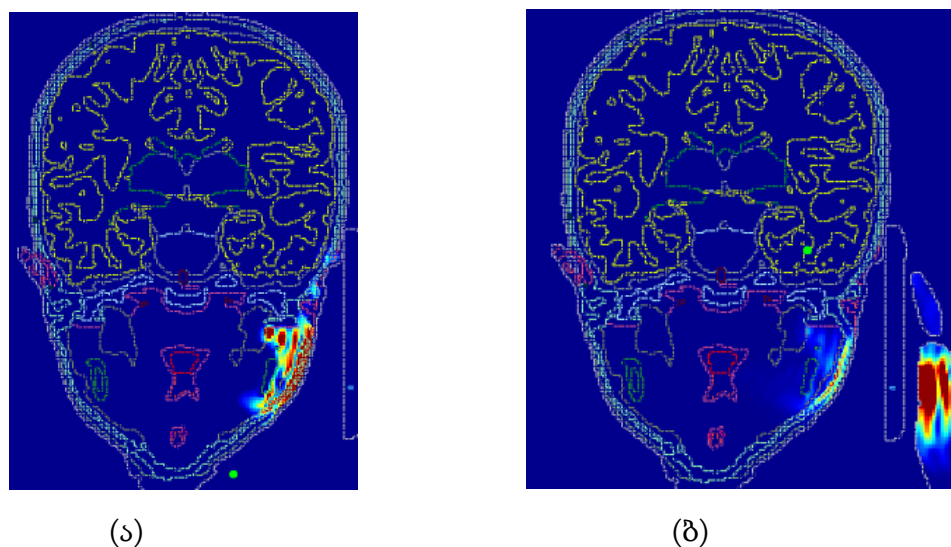
ნათლად ჩანს წარმოდგენილი შედეგებიდან, რომ შორ ზონაში ემ ველის დიაგრამა და ასევე, სრული გადასხივებული სიმძლავრე, მნიშვნელოვნად დამოკიდებული არის იმაზე, მოდელირებისათვის თუ რა სცენარს განვიხილავთ **სურ.**

4.3.4 - სურ.4.3.7. SAR-ის განაწილების შესწავლამ ბავშვის თავის მოდელის შიგნით ნათლად აჩვენა, რომ თუ ხელის გავითვალისწინებთ, პიკური მნიშვნელობა SAR-ის მიიღება ხელის მოდელში, რადგან ხელი მეტ წილ ემ ველის ენერგიას შთანთქავს **სურ.**

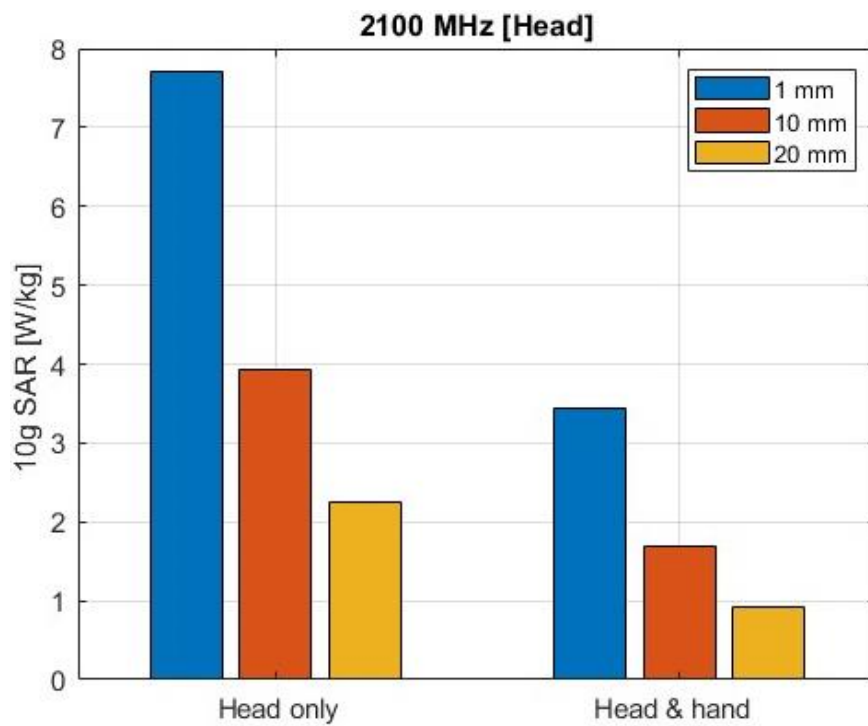
4.3.9 - სურ. 4.3.11.



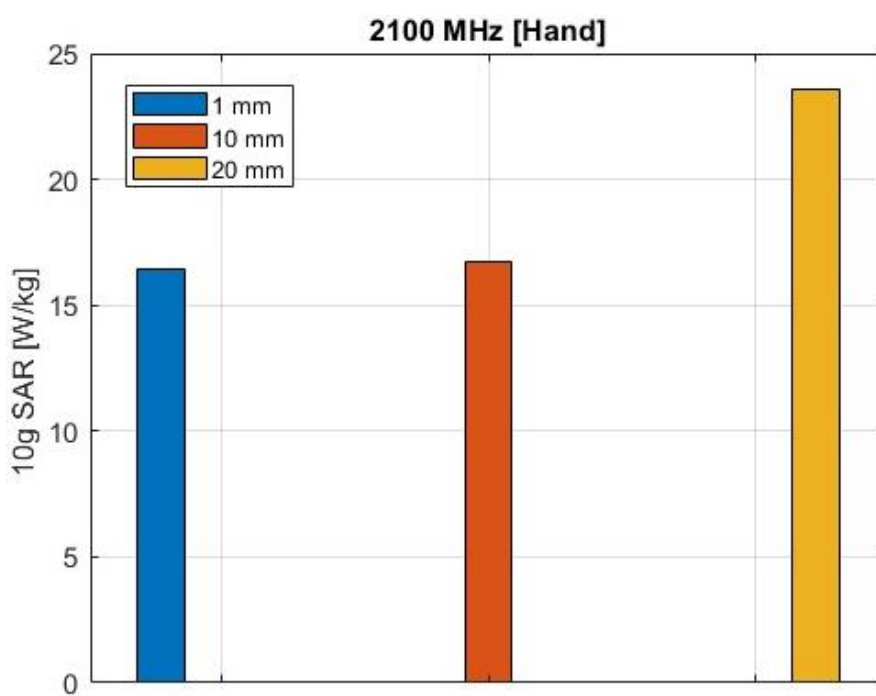
სურათი 4.3.8. 10გSAR განაწილება ხელში და თავში : ა) ტელეფონი მხოლოდ თავთან ერთად, ბ) ტელეფონი ხელით (2100 მგჰც სიხშირე)



სურათი 4.3.9. 10გSAR განაწილება ხელში და თავში: ა) ტელეფონი მხოლოდ თავთან ერთად, ბ) ტელეფონი ხელით (3700 მგჰც სიხშირე)

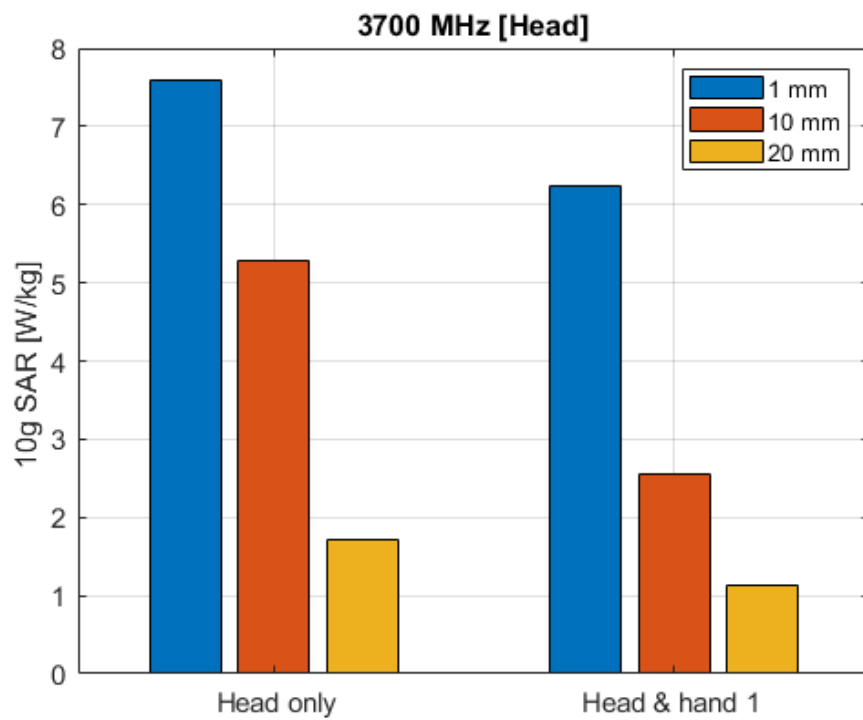


(ა)

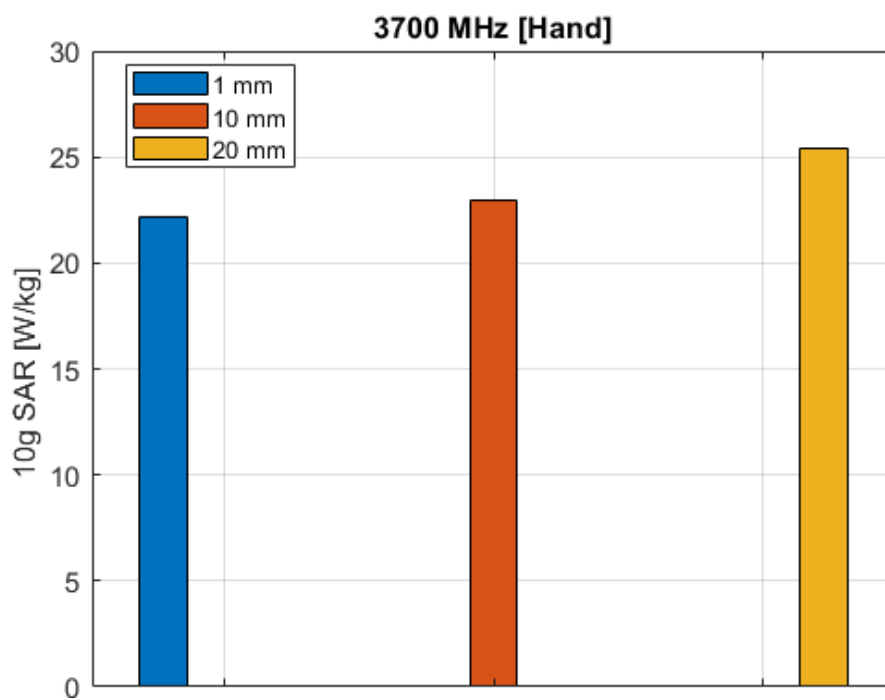


(ბ)

სურათი 4.3.10. 10გ SAR მნიშვნელობები ა) თავში, ბ) ხელის ქსოვილებში (2100 მგჰც სიხშირე, SAR ნორმირებული არის 1 ვატ სიმძლავრეზე).

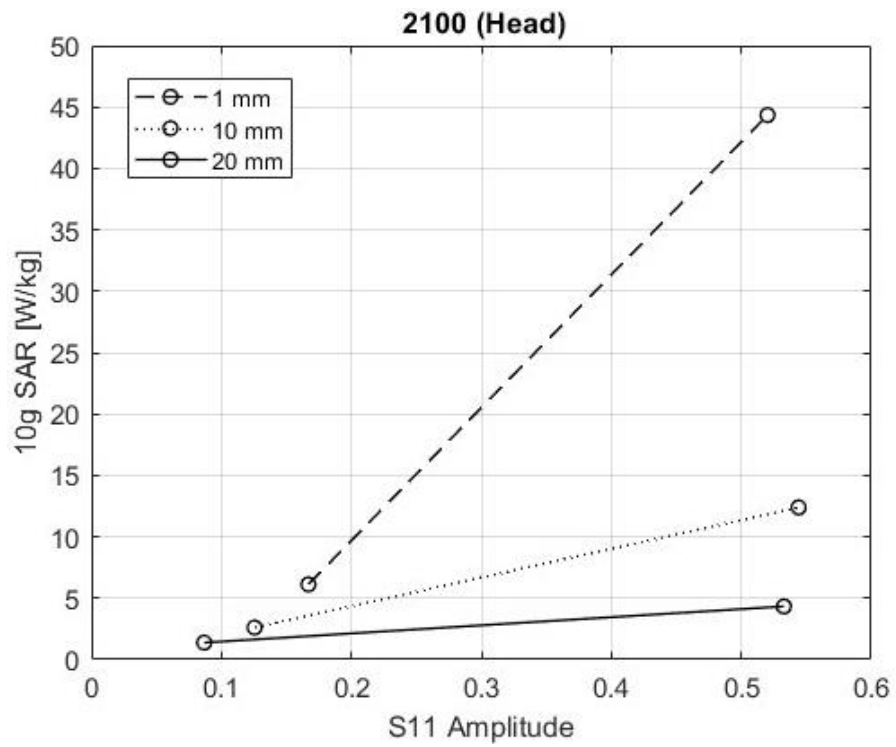


(ა)

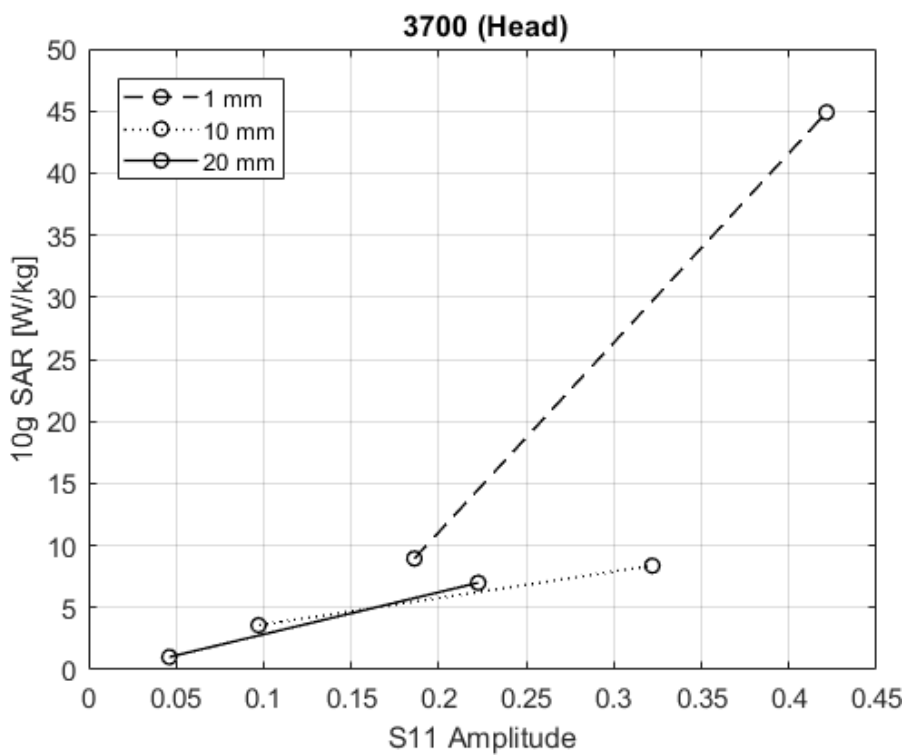


(ბ)

სურათი 4.3.11. 10გ SAR მნიშვნელობები: ა) თავში, ბ) ხელის ქსოვილებში (3700 მგჰც სიხშირე; SAR ნორმირებული 1ვატ სიმძლავრეზე).



(ა)



(ბ)

სურათი 4.3.12. დამოკიდებულება 10გ SAR-ის S11-ზე თავის მოდელისთვის: ა) 2100 მგჰც, ბ) 3700 მგჰც სიხშირეებისას.

ავტომატური გაძლიერების კონტროლი-AGC არის მნიშვნელოვანი ნებისმიერი საკომუნიკაციო მოწყობილობისათვის, რამდენადაც ის სიგნალის სიძლიერის დონეს აკონტროლებს. სიგნალის სიძლიერე, AGC-ის გარეშე, შესაძლოა გარე ფაქტორების გავლენით შეიცვალოს, რაც იწვევს კავშირის ხარისხის გაუარესებას საბაზო სადგურთან. სუსტი კავშირისას, AGC-უზრუნველყოფს სიგნალის გაძლიერებას, რათა აღდგეს შესაბამისი კავშირი საბაზო სადგურებთან. რისთვისაც, ტელეფონი ზრდის სიმძლავრეს, ამის შედეგი მაღალი მნიშვნელობის რეაქტიული ველის წარმოქმნაა ადამიანის თავის მახლობლად. შედეგად, ორივე განხილული სიხშირისათვის, ქსოვილების მიერ შთანთქმული ველის ენერგია -SAR მნიშვნელოვნად იზრდება, სურ. 4.3.12.

დასკვნა

მობილური ტელეფონით კომუნიკაციისას, გამოსხივების ფორმირებაში ძირითადად ადამიანის ხელი, თავი, ანტენა, მონაწილეობს. თავის სიახლოვეს, ხშირ შემთხვევებში, რეაქტიული/მაღალი მნიშვნელობის ემ ველი ფორმირდება. რისთვისაც, დეტალურად გამოკვლეული იქნა, თუ როგორ მოქმედებს ხელის და თითების სხვადასხვა კონფიგურაცია/პოზიცია, მომხმარებელსა და ტელეფონს შორის სხვადასხვა დაშორებები, S11-ტელეფონის ანტენის პარამეტრზე.

დადგინდა ასევე, ტელეფონის ანტენის S11 პარამეტრსა და SAR - ადამიანის ქსოვილების მიერ შთანთქმულ ემ ველის ენერგიას შორის დამოკიდებულება (Kurtsikidze 2023), (Nozadze 2022).

ნაჩვენები იქნა მიღებულ შედეგებზე დაყრდნობით, რომ სასურველია S11 ყოფაქცევა იყოს ერთ-ერთი მაჩვენებელი ტელეფონი უსაფრთხოების სტანდარტებში.

4.4. მობილური ტელეფონების უსაფრთხოების რიცხვითი ტესტირების პროცედურის მონახაზი

1. FDTD მეთოდით გამოსაკვლევი მოდელების მომზადება გამოთვლებისათვის

ადამიანზე ემ დასხივების ზემოქმედების შესასწავლად (FDTD მეთოდით) უნდა მომზადდეს ადამიანის არაერთგვაროვანი მოდელები ხელის (თითების) სხვადასხვა პოზიციით.

ასევე საჭიროა მომზადდეს მობილური ტელეფონის მოდელი შერჩეული სხვადასხვა ტიპის ანტენებით (Dipole, Patch და PIFA და სხვ.); თითოეული შემთხვევისათვის პარამეტრების შერჩევა უნდა მოხდეს ისე, რომ ჰქონდეს მინიმალური S_{11} (არეკვლის)- კოეფიციენტი, რაც ნიშნავს, რომ ანტენა კარგად არის შეთანხმებული თავისუფალ სივრცესთან.

2. მობილური ტელეფონის შერჩეული სახის ანტენების გამოსხივების პარამეტრების შესწავლა ხელის ზეგავლენის გათვალისწინების გარეშე შერჩეულ სიხშირეებზე.

მოხდეს სხვადასხვა სახის ანტენების არეკვლის (S_{11}) კოეფიციენტების განსაზღვრა საკვლევ სიხშირეებზე, ანტენების გამოსხივების დიაგრამების აგება-შესწავლა, რიცხვითი ექსპერიმენტის ამ ეტაპზე, არ ვითვალისწინებთ ხელის ზეგავლენა.

3. მობილური ტელეფონის ანტენების გამოსხივების პარამეტრების შესწავლა ხელის სხვადასხვა პოზიციით დაჭერისას შერჩეულ სიხშირეებზე.

ჩატარდეს რიცხვითი ექსპერიმენტი და განხორციელდეს სხვადასხვა სახის არეკვლის (S_{11}) კოეფიციენტების განსაზღვრა საკვლევ სიხშირეებზე, ანტენების გამოსხივების დიაგრამების აგება-შესწავლა, ხელის მოდელებში შთანთქმული EM ველის ენერგიის (SAR) განსაზღვრა. შევისწავლით რა გავლენას ახდენს ხელის გათვალისწინება S_{11} კოეფიციენტის მნიშვნელობებზე, ანუ ანტენის შეთანხმებაზე თავისუფალ სივრცესთან.

4. ანტენის გამოსხივების პარამეტრების შესწავლა ადამიანის თავისა და ხელის სხვადასხვა პოზიციის გათვალისწინებით საკვლევ სიხშირეებზე.

განხორციელდეს რიცხვითი ექსპერიმენტი ანტენისათვის. შესწავლილ იქნას რა გავლენას ახდენს ადამიანის თავის და ხელის სხვადასხვა პოზიციის გათვალისწინება ანტენის შეთანხმების პირობებზე. მოხდება ანტენის გამოსხივების დიაგრამების აგება-შესწავლა.

5. ანტენის ემ ზემოქმედების შესწავლა ადამიანის თავის მოდელზე ხელის სხვადასხვა პოზიციის გათვალისწინებით საკვლევ სიხშირეებზე.

გამოკვლეულ იქნას მობილური ტელეფონის შერჩეული ანტენის მიერ გამოსხივებული ემ ველის ზემოქმედება ადამიანის არაერთგვაროვან მოდელზე. განისაზღვროს გამოსხივებული ემ ველის ენერგიის რა ნაწილი შთაინთქმება ადამიანის თავისა და ხელის მიერ (SAR) (Liu 2016, 739-746) ასევე, შესაძლებელია ტემპერატურის მატების შეფასება ადამიანის თავისა და ხელის მოდელებში

6. ანტენის ემ ზემოქმედების ადამიანზე შემთხვევაში SAR-ის S11 კოეფიციენტზე დამოკიდებულების განსაზღვრა.

მოხდეს ჩატარებული რიცხვითი ექსპერიმენტებით მიღებული შედეგების შეჯამება, დამუშავება, ანალიზი. რაც საშუალებას მოგვცემს შევაფასოთ როგორი კორელაციაა SAR-სა და S11-ს შორის. ავაგებთ SAR(S11) გრაფიკებს.

დასკვნა: მიღებულ შედეგებზე დაყრდნობით შეგვიძლია შევთავაზოთ მობილური ტელეფონების მწარმოებლებს, რომ S11 ყოფაქცევა იყოს ერთ-ერთი მაჩვენებელი ტელეფონის უსაფრთხოების სტანდარტებში. ამისათვის, მწარმოებლებმა უნდა განახორციელონ მობილური ტელეფონის ანტენის S11 ტესტირება თავისუფალ სივრცესთან მოცემული მონახაზის მიხედვით. გამოიკვლიონ S11 პარამეტრის ცვლილება თავის და ხელის ზეგავლენის გათვალისწინებით და დაადგინონ რა არის ამ ცვლილების მიზეზი. რადგან, თუ მობილური ტელეფონის ანტენა კარგად არის შეთანხმებული თავისუფალ სივრცესთან, არ ასხივებს ადამიანის თავის მიმართულებით, სრულად გადასხივდება მიწოდებული სიმძლავრე და არ იცვლება ანტენის S11 პარამეტრი თავთან და ხელთან სიახლოვის შემთხვევაშიც, მაშინ ანტენა იდეალურია და თავის და ხელის გავლენა არ ცვლის მისი შეთანხმების პირობა

4.4.1. ზოგადი რეკომენდაციები

მიღებული შედეგები გვამცნობს საშუალებას გამოვთქვათ აზრი, რომ მობილური ტელეფონის ემ გამოსხივება უსაფრთხო არ არის. ბიოლოგიური ეფექტების შესწავლამ აჩვენა მობილური ტელეფონების რადიოსიხშირული გამოსხივების უამრავი უარყოფითი ეფექტი, მათ შორის ტვინის კიბოს რისკის მომატება, დნმ-ის დაზიანება, ოქსიდაციური სტრესი, იმუნური დისფუნქცია, ძილის ცვლილებები, ჰიპერაქტიურობა და სხვა (Abdul-Al 2022, 511).

შედეგების შეჯამების საფუძველზე კიდევ ერთხელ განმტკიცებულ იქნა ზოგადი რეკომენდაციები მობილური ტელეფონის გამოსხივების შესაძლო მავნე ზეგავლენის თავიდან ასარიდებლად:

- ჩართეთ თვითმფრინავის რეჟიმი, როდესაც ბავშვს აძლევთ სათამაშოდ მობილური ტელეფონს. ასევე, არ არის სასურველი კომუნიკაციისას ორსულმა მუცელთან ახლოს დაიჭიროს მობილური ტელეფონი, რათა თავიდან აიცილოთ ნაყოფზე ემ გამოსხივების შესაძლო მავნე ზემოქმედება. სასურველია გამოიყენეთ „ხმამაღალი საუბრის რეჟიმი“ ან ყურსასმენი, როდესაც იყენებთ მობილურ ტელეფონს.
- მაქსიმალურად შეზღუდეთ ბავშვების მიერ ტელეფონების გამოყენების ხანგრძლივობა. გარდა გადაუდებელი შემთხვევებისა და ამ შემთხვევაშიც სასურველია კომუნიკაცია განახორციელონ „ხმამაღალი საუბრის რეჟიმის“ გამოყენებით. რადგან, მათი სხეულის მცირე ზომების და ფიზიკური თვისებების გამო, ემ ველის ენერგიის შთანთქმა უფრო მაღალია ზრდასრულ ადამიანთან შედარებით
- გამორთეთ უკაბელო ემ მოწყობილობები ემ გამოსხივების ზემოქმედების შესამცირებლად, როცა მათ აქტიურად არ იყენებთ. გამორთეთ ტელეფონები და Wi-Fi როუტერი ძილის წინ. შეამცირეთ ტელეფონების ან Wi-Fi-ის გამოყენების ხანგრძლივობა.
- მოერიდეთ მობილური ტელეფონის გამოყენებას, როდესაც სიგნალი სუსტია. გაითვალისწინეთ, რომ როდესაც თქვენ იმყოფებით ცუდი მიღების ზონაში, ტელეფონი გაზრდის RF გამოსხივების სიმძლავრეს, რათა აღადგინოს კავშირი.

მნიშვნელოვანია რეკომენდაციების გათვალისწინება მობილური ტელეფონების მომხმარებლების მიერ, რათა თავიდან იქნას არიდებული შესაძლო უარყოფითი ეფექტები, რადგან ემ ზემოქმედებასთან დაკავშირებულ ეფექტებს აქვს დაგროვების ბუნება და შესაძლო უარყოფითმა შედეგებმა თავი იჩინოს მომავალში (Abdul-Al 2022, 511).

4.4.2. დასკვნა

დისერტაციის ფარგლებში შესასწავლად შერჩეული იქნა მეტად აქტუალური სამეცნიერო პრობლემა, რომელიც დაკავშირებულია ადამიანზე საკომუნიკაციო მოწყობილობების მიერ გამოსხივებული ემ ველების ზემოქმედებით გამოწვეული სითბური ეფექტების შეფასებასთან.

კომპიუტერულმა მოდელირებამ/სიმულაციამ საშუალება მოგვცა რეალურ ცხოვრებაში არსებული მოვლენის კომპიუტერზე მათემატიკური, გრაფიკული/ალგორითმული წარმოდგენების აგების და კომპიუტერული პროგრამული უზრუნველყოფის გამოყენებით მისი განხორციელების, საკვლევი სისტემების ქცევის პროგნოზირების და შესწავლის მიზნით;

კომპიუტერული მოდელირება/სიმულაცია უკანასკნელ პერიოდში ძირითად მეცნიერულ შესაძლებლობად გადაიქცა, რამდენადაც მეცნიერებს საშუალებას აძლევს ჩაატარონ ათასობით იმიტირებული ექსპერიმენტი კომპიუტერული ალგორითმების, კომპიუტერული პროგრამების და რიცხვითი მოდელების გამოყენებით. ფართოდ გამოიყენება თითქმის ყველა სამეცნიერო მიმართულებით. რიცხვითი მოდელირების უპირატესობა ექსპერიმენტული გაზომვების მიმართ საკმაოდ თვალსაჩინოა. რიცხვითი მოდელირება საშუალებას იძლევა დიდი მოცულობის მონაცემების სწრაფად ანალიზის და პროგნოზირების, რაც ხშირად რთულია რეალური ექსპერიმენტებით.

დისერტაციის ფარგლებში განხორციელებული კვლევა ინოვაციურია და წარმოადგენს საფუძველს მობილური ტელეფონების ელექტრომაგნიტური უსაფრთხოების დეტალური კვლევის. რამდენადაც, მწარმოებლები წარმოების პროცესში არ ითვალისწინებენ მობილური ტელეფონების რეალურ გამოყენებას, კერძოდ მობილური ტელეფონის ხელში დაჭერას და მის ზემოქმედებას ტელეფონით კომუნიკაციისას ანტენის შეთანხმების პირობებზე.

დისერტაციის ფარგლებში შეიქმნა ხელის 3D რეალისტური მოდელები, ტელეფონის ხელით დაჭერის პოზიციების გათვალისწინებით; რომელიც სიახლეა და საინტერესო მიდგომაა ტელეფონების უსაფრთხოების ტესტირების პროცესში. აღნიშნული მოდელები გრაფიკული პროგრამების გამოყენებით შეიქმნა და

შემუშავებული ახალი ალგორითმის მიხედვით, კომპიუტერული მოდელირებით განვახორციელეთ მობილური ტელეფონების უსაფრთხოების ტესტირება რეალური გამოყენების პირობების შესაბამისად შერჩეულ სიხშირეებზე.

ჩატარდა რიცხვითი ექსპერიმენტები მოდელების რთული გეომეტრიის, სწორად შერჩეული დისკრეტიზაციის, ქსოვილების ჰეტეროგენულობის გათვალისწინებით, რაც მიღებული შედეგების მაღალ სანდოობას განაპირობებს. კომპიუტერული მოდელირებამ მოგვცა საშუალება, რომ გამოგვეკვლია ადამიანის სხეულის (მათ შორის, ხელის ზეგავლენის გათვალისწინებით და ზეგავლენის გათვალისწინების გარეშე) არაერთგვაროვანი მოდელები და განგვეხილა სხვადასხვა რეალისტური შემთხვევები/სცენარები.

როგორც ზემოთ აღვნიშნეთ მიღებულ შედეგებზე დაყრდნობით, ნაჩვენები იქნა, რომ სასურველია S11 ყოფაქცევა იყოს ერთ-ერთი მაჩვენებელი ტელეფონის უსაფრთხოების სტანდარტებში. ამისათვის, მწარმოებლებმა უნდა განახორციელონ მობილური ტელეფონის ანტენის S11 ტესტირება თავისუფალ სივრცესთან. ასევე, გამოიკვლიონ S11 პარამეტრის ცვლილება თავის და ხელის ზეგავლენის გათვალისწინებით და დაადგინონ რა არის ამ ცვლილების მიზეზი. თუ მობილური ტელეფონის ანტენა კარგად არის შეთანხმებული თავისუფალ სივრცესთან, არ ასხივებს ადამიანის თავის მიმართულებით, სრულად გადასხივდება მიწოდებული სიმძლავრე და არ იცვლება ანტენის S11 პარამეტრი თავთან და ხელთან სიახლოვის შემთხვევაშიც, მაშინ ანტენა იდეალურია და თავის და ხელის გავლენა არ ცვლის მისი შეთანხმების პირობას. რადგან ადამიანზე ემ დასხივების რეალური ექსპერიმენტის ჩატარება არ არის ნებადართული, დისერტაციაში დასახული ამოცანები შევისწავლეთ კომპიუტერული მოდელირების გამოყენებით. კვლევის მეთოდს წარმოადგენს დროით არეში სასრული სხვაობების (FDTD) მეთოდი. რიცხვითი ექსპერიმენტები ჩატარდა ივანე ჯავახიშვილის სახელობის თბილისის სახელმწიფო უნივერსიტეტის, გამოყენებითი ელექტროდინამიკისა და რადიო ინჟინერიის ლაბორატორიაში შექმნილი FDTD მეთოდზე დაფუძნებული პროგრამული პაკეტით FDTD Lab (ემ და თერმული სოლვერი) 1მმ დისკრეტიზაციის ქალის და ბავშვის თავის 3D არაერთგვაროვან მოდელზე ("Virtual Population", IT'IS Foundation). ემ დასხივება

განხორციელდა კვლევისათვის შერჩეულ 2100, 3700 [მგჰც] სიხშირეების შესაბამისი სინუსოიდალური სიგნალებით.

მიღებული შედეგების შეჯამების საფუძველზე შემუშავდა და განმტკიცდა რეკომენდაციები ტელეფონის სწორად გამოყენების შესახებ რეაქტიული EM ველის შესამცირებლად და შესაბამისად, რათა შემცირდეს SAR მნიშვნელობები ადამიანის თავში. ნაჩვენები იქნა, რომ არსებული უსაფრთხოების საერთაშორისო სტანდარტები (დაშვებული SAR ლიმიტები) საჭიროებს გადახედვას და მწარმოებლებმა ყურადღება უნდა მიაქციონ ხელის გავლენას მობილური ტელეფონების უსაფრთხოების ტესტირების პროცესში.

გამოვიკვლიეთ სითბური ეფექტები, რომელიც თავს იჩენს მობილური ტელეფონის ანტენის მიერ გამოსხივებული ემ ველით დასხივებისას ადამიანის არაერთგვაროვან მოდელებზე ხელის (თითების) სხვადასხვა პოზიციის და მობილურის (ხელთან ერთად) ადამიანის თავის მოდელიდან დაცილების განსხვავებული მანძილებისათვის (1მმ, 10მმ, 20მმ) ; მნიშვნელოვანია შევაფასოთ ადამიანის თავში შთანთქმული სიმძლავრე ხელის ზეგავლენის გათვალისწინებით და შედარებითი ანალიზის წარმოება ხელის გარეშე სცენარებისათვის. ასევე მნიშვნელოვანია, SAR-ის ანტენის შეთანხმების პირობებზე დამოკიდებულების შესწავლა. მობილური ტელეფონის უსაფრთხოდ გამოყენებისთვის რეკომენდაციების შემუშავება, ადამიანის თავის სიახლოვეს რეაქტიული ველის შესამცირებლად; რათა თავში SAR მნიშვნელობები იქნას მინიმუმამდე დაყვანილი (Aisyah-Husni 2014, 871-876) (Abdul-Al 2022, 511).

4.4.3 შედეგები გამოტანილი დაცვისათვის

- შეიქმნა და დამუშავდა ხელის მოდელები, მობილურის დაჭერის რეალისტური პოზიციების გათვალისწინებით, მათი შემდგომი სტანდარტიზაციის მიზნით.
- მომზადდა/დამუშავდა და გამოიკვლეული იქნა რეალისტური რიცხვითი მოდელები მობილური ტელეფონების ტესტირებისთვის ელექტრომაგნიტური უსაფრთხოების თვალსაზრისით.
- კვლევის ფარგლებში შემუშავდა რიცხვითი ტესტირების ახალი ალგორითმი/პროცედურის მონახაზი. ნაჩვენები იქნა რამდენად განხორციელებადია რეალისტური მოდელების კვლევა, რა სირთულეებს შეიძლება ქონდეს ადგილი, რა ეფექტები, მომენტები იჩენს თავს მოდელირების პროცესში. ამ მიზნით, დეტალურად იქნა გამოკვლეული, თუ რა ზეგავლენას ახდენს ხელისა და თითების სხვადასხვა კონფიგურაცია-პოზიცია, სხვადასხვა დაშორებები მომხმარებელსა და ტელეფონს შორის, ტელეფონის ანტენის პარამეტრზე (S11 კოეფიციენტზე) (Apollonio 2015).
- ასევე, დადგენილი იქნა კორელაცია S11 პარამეტრსა და ადამიანის ქსოვილების მიერ შთანთქმულ ელექტრომაგნიტური ველის ენერგიას (SAR) შორის იმის გათვალისწინებით, რომ თანამედროვე “სმარტფონებს” გააჩნიათ ფუნქცია ავტომატურად გაზარდონ გამოსხივების სიმძლავრე საიმედო კავშირის მისაღწევად სუსტი სიგნალისას საბაზო სადგურთან (Abdul-Al 2022, 511), (Liu 2016, 739-746).
- მიღებულ შედეგებზე დაყრდნობით, ნაჩვენები იქნა, რომ სასურველია S11 ყოფაქცევა იყოს ერთ-ერთი მაჩვენებელი ტელეფონის უსაფრთხოების სტანდარტებში. ამისათვის, მწარმოებლებმა უნდა განახორციელონ მობილური ტელეფონის ანტენის S11 ტესტირება თავისუფალ სივრცესთან. ასევე, გამოიკვლიონ S11 პარამეტრის ცვლილება თავის და ხელის ზეგავლენის გათვალისწინებით და დაადგინონ რა არის ამ ცვლილების მიზეზი. თუ მობილური ტელეფონის ანტენა კარგად არის შეთანხმებული

თავისუფალ სივრცესთან, არ ასხივებს ადამიანის თავის მიმართულებით, სრულად გადასხივდება მიწოდებული სიმძლავრე და არ იცვლება ანტენის S11 პარამეტრი თავთან და ხელთან სიახლოვის შემთხვევაშიც, მაშინ ანტენა იდეალურია და თავის და ხელის გავლენა არ ცვლის მისი შეთანხმების პირობას.

- მიღებული შედეგების შეჯამების საფუძველზე შემუშავდა და განმტკიცდა რიგი ზოგადი რეკომენდაციები ტელეფონის სწორად გამოყენების შესახებ რეაქტიული EM ველის შესამცირებლად და შესაბამისად, რათა შემცირდეს SAR მნიშვნელობები ადამიანის თავში.
- მიღებული შედეგების საფუძველზე ნაჩვენები იქნა, რომ არსებული უსაფრთხოების საერთაშორისო სტანდარტები (დაშვებული SAR ლიმიტები) საჭიროებს გადახედვას და მწარმოებლებმა ყურადღება უნდა მიაქციონ ხელის გავლენას მობილური ტელეფონების უსაფრთხოების ტესტირების პროცესში.
- წარმოდგენილი კვლევის შედეგებზე დაყრდნობით ნაჩვენები იქნა, მობილური ტელეფონების უსაფრთხოების ტესტირების სტანდარტში ცვლილებების შეტანის საჭიროება და ამ ცვლილებების განხორციელების შესაძლებლობების კვლევის მნიშვნელოვნება. სასურველია მწარმოებლების მიერ, მობილური ტელეფონების უსაფრთხოების ტესტირება განხორციელდეს ადამიანის რეალისტური მოდელების გამოყენებით, ტელეფონის დაჭერის რეალისტური პოზიციების გათვალისწინებით, რიცხვითი გამოთვლების გზით გაცილებით რეალისტური სურათის წარმოსაჩენად.

სასურველია საერთაშორისო ორგანიზაციები, როგორიცაა ICNIRP, FCC, ETSI, EBEA, BEMS, IEEE და სხვ.; კომპანიები, რომლებიც ავითარებენ 5G სისტემებს, მობილური მწარმოებლების ფორუმი (MMF) დაინტერესდნენ წარმოდგენილი დისერტაციის შედეგებით. სასურველია ამ კვლევის ფარგლებში მიღებული შედეგების და რეკომენდაციების გათვალისწინება მობილური ტელეფონების მწარმოებელი კომპანიების მიერ მობილური ტელეფონების უსაფრთხოების

ტესტირების პროცესში, ასევე მომხმარებლების მიერ შესაძლო უარყოფითი შედეგების თავიდან არიდების მიზნით.

დანართი 1.

FDTD Lab პროგრამული პაკეტის კოდის ფრაგმენტი

წარმოდგენილია პროგრამული პაკეტის კოდის ფრაგმენტი (პრიშვინი 2011):

```
while (cond)
{
    bool temp=false;
    int i=0;
    for(int j=0;j<CGeometry::getInstance()->
branches.size();j++)
    {
        if (CGeometry::getInstance()->branches[j]->
halted==STOP_NONE)
            {
                CGeometry::getInstance()->
branches[j]-> growByPoint();
                temp=true;
            }
    }
    cond=temp;
}

if (halted==STOP_NONE)
{
    dvector temp;
    if (iCurLength==0)

        points.push_back(reper.position);
    temp=reper.move();

    CGeometry::getInstance()->points.push_back(temp);
    CSuperGrid::getInstance()->accept(temp);

    points.push_back(temp);
    iCurLength++;
    ending=temp;
    if ((iNumOfPts==(iLength-1)) || halted==STOP_END)
```

```

{
    if(halted!=STOP_END) halted=STOP_HALT;
    if(iCurLevel<=MAX_LEVELS&& iChildes>0)
    {
        for(int j=0;j < iChildes;j++)
        {
            CBranch* newChild=new
            CBranch(ending,iCurLevel+1,reper.calcReper(),
            type,this);
            CGeometry::GetInstance()->
            branches.push_back(newChild);
            this->children.push_back(newChild);
        }
    }
    else
    {
        CGeometry::GetInstance()->
        endings.push_back(ending);
        halted=STOP_HALT;
    }
}
iNumOfPts++;
}
return result;
}

CReper::CReper(dvector _pos)
{
    position=_pos;
    init();
}

CReper::CReper(double _x,double _y, double _z)
{
    position=dvector(_x,_y,_z);
    init();
}

```

```

void    CReper::init()
{
    k=1.5;
    kapa=1.12;
    tau=dvector(0,-1,0);
    niu=dvector(1,0,0);
    beta=tau^niu;
    halted=STOP_NONE;
}

double  CReper::calcK()
{
    int minus=1;
    double mrand=rand();
    mrand/=RAND_MAX;
    if(RAND&&mrand<0.5) minus=-1;
    return (mrand-0.5)*k;
}

double  CReper::calcKapa()
{
    int minus=1;
    double mrand=rand();
    mrand/=RAND_MAX;
    if(RAND&&mrand<0.5) minus=-1;
    return minus*(mrand-0.5)*kapa;
    //return kapa;
}

dvector CReper::move(void)
{
    double DSS=DS;
    dvector oldTau;
    dvector oldNiu;
    double k_=calcK();
    oldTau=tau;
    oldNiu=niu;

    niu=-tau*k_+beta*calcKapa()+niu;
    tau=k_*oldNiu+tau;
}

```

```

    tau=tau/abs(tau);
    niu=niu/abs(niu);
    beta=tau^niu;

    //////////////////////////////////

    recalcDirections(ROT_SELF|ROT_GEO); //

    //////////////////////////////////

    position=position+DSS*tau;
    //std::cout << "*";
    return position;
}

CReper CReper::rotate()
{
    double fi,psi,ksi;
    fi=0.4*M_PI_2*rand()/RAND_MAX;
    psi=0.4*M_PI_2*rand()/RAND_MAX;
    ksi=0.4*M_PI_2*rand()/RAND_MAX;
    return rotate(fi,psi,ksi);
}

CReper CReper::rotate(double fi, double psi, double ksi)
{
    dvector tau2,niu2,beta2;

    niu2=(cos(fi)*cos(psi)-sin(fi)*sin(psi)*cos(ksi))*niu+
        (sin(fi)*cos(psi) + cos(fi)*sin(psi)*cos(ksi))*tau+
        (sin(psi)*sin(ksi))*beta;
    tau2=-(cos(fi)*sin(psi)+sin(fi)*cos(psi)*cos(ksi))*niu-
        (sin(fi)*sin(psi)-cos(fi)*cos(psi)*cos(ksi))*tau+
        (cos(psi)*sin(ksi))*beta;
    beta2=(sin(fi)*sin(ksi))*niu - (cos(fi)*sin(ksi))*tau +
    cos(ksi)*beta;

    return CReper(tau2,niu2,beta2,position);
}

CReper CReper::calcReper()

```

```

{
    CReper _reper;
    if(FREE)
        return rotate();
    return _reper;
}

dvector CReper::rotateVector(dvector vec,dvector axis, double
angle)
{
    dvector zv=vec^axis;
    if(abs(zv)==0) return vec;
    return dvector(0,0,0);
}

void    CReper::recalcDirections(int rotType)
{
    dvector field=calcField(position,rotType);
    dvector psi=tau+field;
    dvector n=tau^psi;
    tau=tau+field;
    double length=abs(tau);
    if(length>0)
        tau=tau/length;
    double alfa=acos((psi*tau)/(abs(psi)*abs(tau)));
    if(alfa!=alfa)
        alfa=0;
    CBasis::rotateReper(this->niu,this->beta,this->tau,n,alfa);
}

dvector CReper::calcField(dvector point,int rotType)
{
    dvector sum=dvector(0,0,0);

    if(rotType&ROT_SELF)
    {
        sum=CSuperGrid::getInstance()->
        calcField(point,ROT_SELF);
    }
}

```

```

        if(rotType&ROT_GEO)
        {
            sum=sum+CSuperGrid::getInstance()->
                calcField(point,ROT_GEO);
        }
        return sum;
    }

dvector CReper::calcSourceField(dvector point,dvector source,int
source_type)
{
    int mult=SRC_GEO;
    if(source_type==SRC_GEO)
        mult=MULT_GEO;
    if(source_type==SRC_SELF)
        mult=MULT_SELF;
    if(source_type==SRC_ENDS)
        mult=MULT_ENDS;

    dvector R=point - source;
    double length=abs(R);
    if(length<mult*DS&&length>0)
        R=(1/abs(R))*R;
    else
        R=dvector(0,0,0);
    return R;
}

dvector CSuperGrid::calcField(dvector point, int rot_type)
{
    dvector sum;
    if(rot_type&ROT_SELF&&points.size()>0)
    {
        for(int i=0;i<points.size();i++)
        {
            double r = abs(point-points[i]);
            if(r>0&&r<DS*MULT_SELF)
                sum=sum+
calcSourceField(point,points[i],SRC_SELF);
        }
    }
}

```

```

        if(rot_type&ROT_GEO&&geometry.size()>0)
        {
            for(int i=0;i<geometry.size();i++)
            {
                double r = abs(point-geometry[i]);
                if(r>0&&r<DS*MULT_GEO)
                    sum=sum+
calcSourceField(point,geometry[i],SRC_GEO);
            }
        }
        return sum;
    }

dvector CSuperGrid::calcSourceField(dvector point,dvector
source,int source_type)
{
    double mult;
    double length;
    switch(source_type)
    {
        case SRC_GEO:
            mult=MULT_GEO;
            length=GEO_STRENGTH;
            break;
        case SRC_SELF:
            mult=MULT_SELF;
            length=VELOCITY_STRENGTH;
            break;
        case SRC_ENDS:
            mult=MULT_ENDS;
            break;
        default:
            mult=SRC_GEO;
            break;
    }
    dvector R=point - source;
    double len=abs(R);
    if(length>0)
        R=R/len;
    return length*R;
}

```

```

void CNumericalGrid::Run()
{
    bool stop=false;
    while(!stop)
    {
        stop= Step();
        CheckStability();
    }
}

bool CNumericalGrid::Step()
{
    float cur=0;
    float max=0;
    float avg=0;
    float n_ofPts=(float) area->nx*area->ny*area->nz;
    int ii,jj,kk;
    bool stop=false;

    for(int i=minimax->start_x;i<minimax->end_x;i++)
        for(int j=minimax->start_y;j<minimax->end_y;j++)
            for(int k=minimax->start_z;k<minimax->end_z;k++)
            {
if(cells[i][j][k]!=0&&sources[i][j][k]==0)
    newVelocity[i][j][k]=currentVelocity[i][j][k] +
    dt*CalcVelocity(i,j,k);
if(IsBoundary(i,j,k))
    KillNormalComponents(i,j,k);
            }
}

```



```

        cur=abs(currentVelocity[i][j][k]);
        if(cur>max)
            max=cur;
        if(cur != cur)
            cur=0;
        avg+=cur/n_ofPts;
        maxVelocity=max;

    _time++;

    if(_time%10==0)
    {
        float mult=avg<average?10:-1;
        stop=mult*(average-avg) < Config::StabilityCriterium*avg;
        average=avg;

    }

    swapPointers();

return stop;
}

fvector CNumericalGrid::CalcVelocity(int i, int j, int k)
{
    fvector velocity;
    velocity=Derive(currentVelocity,i,j,k,2);
    return velocity;
}

float CNumericalGrid::Derive(float*** cells, int_ijk, int level)
{
    CheckIndices(i, j, k);
    float value = 0;
    switch (level)
    {
        {
        case 1: //პირველი რიგის წარმოებული
            value =
                (cells[i + 1][j][k] + cells[i - 1][j][k]) / (2 * area->dx)+
                (cells[i][j + 1][k] + cells[i][j - 1][k]) / (2 * area->dy)+
                (cells[i][j][k + 1] + cells[i][j][k - 1]) / (2 * area->dz);

```

```

        break;
    case 2:
        value =
(cells[i-1][j][k] + cells[i + 1][j][k]) / (area->dx * area->dx)+
(cells[i][j-1][k] + cells[i][j + 1][k]) / (area->dy * area->dy)+
(cells[i][j][k-1] + cells[i][j][k + 1]) / (area->dz * area->dz)

        - 2 * cells[i][j][k] / (area->dx * area->dx)
        - 2 * cells[i][j][k] / (area->dy * area->dy)
        - 2 * cells[i][j][k] / (area->dz * area->dz);
        break;
    }
    return value;
}

```

გამოყენებული ლიტერატურა

1. კაკულია, დავით კაკულია. 2003. „ღია მეტალური ზედაპირების სიხშირული მახასიათებლების შესწავლა დამხმარე გამომსხივებლების მეთოდით“, „თბილისის სახელმწიფო უნივერსიტეტი“.
2. ნოზაძე. 2018. „საკომუნიკაციო სიხშირეების გამოსხივების ზეგავლენის შესწავლა ადამიანზე სხვადასხვა ფიზიკურ პირობებში“, „თბილისის სახელმწიფო უნივერსიტეტი, 2018.“
3. პრიშვინი. 2011. „სუსტი ელექტრომაგნიტური გამოსხივების ზემოქმედების შესწავლა ადამიანის რეალისტურ მოდელზე“, „თბილისის სახელმწიფო უნივერსიტეტი, 2011.“
4. შოშიაშვილი. 2006. " "ცოცხალ ორგანიზმზე ელექტრომაგნიტური გამოსხივების ზემოქმედების მოდელირება" :.. " თბილისის სახელმწიფო უნივერსიტეტი, 2006.
5. ჯელაძე. 2015. " "ელექტრომაგნიტური გამოსხივების ზემოქმედების შესწავლა ადამიანის მოდელებზე მცირე მანძილებისთვის და ფართომასშტაბიანი სცენარებისთვის" :.. " თბილისის სახელმწიფო უნივერსიტეტი, 2015.
6. ქურციკიძე მთვარისა, ვერიკო ჯელაძე, თამარ ნოზაძე,. 2022. „მობილური ტელეფონი სანტენის შეთანხმების შესწავლა თავისუფალ სივრცესთან“. „საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, შრომები- მართვის ავტომატიზებული სისტემები. No1(33), vol.1, 2022. 36-39.
7. [Online]. 2017. <http://niremf.ifac.cnr.it/tissprop/htmlclie/htmlclie.htm#atsftag>.
<http://niremf.ifac.cnr.it/tissprop/htmlclie/htmlclie.htm#atsftag>.
8. [Online]., IT'IS Foundation. 2021. <http://www.itis.ethz.ch/news-events/news/virtualpopulation/enhanced-virtual-family-models-ella-duke-billie-thelonious/> . <http://www.itis.ethz.ch/news-events/news/virtualpopulation/enhanced-virtual-family-models-ella-duke-billie-thelonious/> .
9. n.d. <http://niremf.ifac.cnr.it/tissprop/htmlclie/htmlclie.htm#atsftag>.
10. Abdul-Al, Ahmed S. I. Amar, Issa Elfergani, Richard Littlehales, Naser Ojaroudi Parchin, Yasir Al-Yasir, Chan Hwang See, Dawei Zhou, Zuhairiah Zainal Abidin, Mohammad Alibakhshikenari, Chemseddine Zebiri, Fauzi Elmegri, Musa Abusitta, Atta Ullah,. 2022. " "Wireless Electromagnetic Radiation Assessment Based on the Specific Absorption Rate (SAR): A Review Case Study", „Electronics. <https://doi.org/10.3390/electronics11040511>.

11. Aisyah-Husni, Md. Ikbal-Hossain, M. Tariqul-Islam and N. Misran M. R. Iqbal-Faruque,. 2014. "Effects of Mobile Phone Radiation onto Human Head with Variation of Holding Cheek and Tilt Positions," 12,," *Journal of Applied Research and Technology*, vol. pp. 871-87.
12. Anjana, Charu Kohli, and Gopal Krishna Ingle. Jitendra Kumar Meena,. 2016. "„Mobile phone use and possible cancer risk: Current perspectives in India“,". *Indian J Occup Environ Med*, vol. 20(1), pp. 5–9,.
13. Apollonio, R. Pinto, and M. Liberti Paffi,. 2015. "Scenarios Approach to the Electromagnetic Exposure: The Case Study of a Train Compartment,." *Hindawi Publishing Corporation BioMed Research International*.
14. Asadollah, Amir Ganj-Karami, Razieh Samimi-Doost, Atefe Pour-Abedi, Ali Babaie. Seyed Mortavazi,. 2009. "Alterations in TSH and Thyroid Hormones following Mobile Phone Use," *Oman Med J*, vol. 24(4),." pp. 274–278,.
15. Asl, B. Larijani, M. Zakerkish, F. Rahim, K. Shirbandi, R. Akbari,. 2019. "The possible global hazard of cell phone radiation on thyroid cells and hormones: A systematic review of evidences, 26 (18) (2019), pp." *Environmental Science and Pollution Research*, pp. 18017-18031.
16. Baan, R, Grosse, Y, Lauby-Secretan, B, El Ghissassi, F, Bouvard, V, Benbrahim-Tallaa, L, Guha, N, Islami, F, Galichet, L, and Straif, K (2011). 2011. "Carcinogenicity of radiofrequency electromagnetic fields.." *Lancet Oncol.* 12, pp. 624-626.
17. Balanis. 2005. "„ANTENNA THEORY ANALYSIS AND DESIGN“." *A JOHN WILEY & SONS, INC., PUBLICATION*, pp. 1-1074.
18. Balanis, Constantine A. 1997. *Antenna Theory , Analysis and Disign*. New York: John Wiley and Sons, INC.
19. Bernardo. 2003. "Specific Absorption Rate and Temperature Elevation in a Subject Exposed in the Far-Field of Radio-Frequency Sources Operating in the 10–900-MHz Range,." *IEEE TRANSACTIONS ON BIOMEDICAL ENGINEERING*, vol. VOL. 50, no. NO. 3,.
20. Busljeta, I. Trosic I. 2006. "Erythropoietic dynamic equilibrium in rats maintained after microwave irradiation *Exp Toxicol Pathol.*,"." vol. 57(3), pp. 247-251,.
21. Carlberg M, Hansson Mild K. Hardell L,. 2013. " "Use of mobile phones and cordless phones is associated with increased risk for glioma and acoustic neuroma," ." *Pathophysiology*, vol. 20(2), pp. 85-110, .

22. Chao, Chuanjun Yang, Regan Siqiang Caib Hong Yea Linlin Duanac Ziyan Zhangac Zhenhua Shiackangwei Linac Jinc hao Songa Xiaomei Huangac Hongying Zhangac Jianbo Yangac PengCaiac,. 2019. "Analysis of the relationship between electromagnetic radiation characteristics and urban functions in highly populated urban areas", " *Science of The Total Environment, Volume 654*, pp. 535-540.
23. David, M.E. Roberts, J.A. 2021. "Smartphone Use during the COVID-19 Pandemic: Social Versus Physical Distancing." *Int. J. Environ. Res. Public Health* 2021, 18, pp. 1034.
24. Dhami. 2015. "Studies on Cell-phone Radiation Exposure Inside a Car and Near a Bluetooth Device", " *Int. J. Environ. Res*, vol. 9, no. 3, pp. 977-980, 2015.
25. Everaert, D. Bauwens,. 2007. "A possible effect of electromagnetic radiation from mobile phone base stations on the number of breeding House Sparrows (*Passer domesticus*)", " *Electromagnetic Biology and Medicine*, 26(2007) pp.63-72.
26. Faruque, M.R.I., & Islam, M.T. Hossain,. 2015. "Analysis on the effect of the distances and inclination angles between human head and mobile phone on SAR", " *Progress in Biophysics and Molecular Biology*, 2015. .
27. Foundation, T'IS. 2019. <http://www.itis.ethz.ch/itis-for-health/tissueproperties/database/database-summary/> 99. <http://www.itis.ethz.ch/itis-for-health/tissueproperties/database/database-summary/> 99.
28. Gandhi, Om P. 1996. "Electromagnetic Absorption in the Human Head and Neck for Mobile Telephones at 835 and 1900 MHz", " *IEEE TRANSACTIONS ON MICROWAVE THEORY AND TECHNIQUES*, vol. VOL 44, no. NO 10, .
29. Hardell. 2018. "Effects of Mobile Phones on Children's and Adolescents' Health: A Commentary", " *US National Library of Medicine National Institutes of Health*, vol. 89(1), pp. 137-140,.
30. Hardell, Carlberg, Mild. 2005. "Use of cellular telephones and brain tumour risk in urban and rural areas." *Occup Environ Med.* 62, pp.390-394.
31. Hardell, L, Carlberg, M, Soderqvist, F, Mild, KH, and M Organ. LL. 2007. "long-term use of cellular phones and brain tumours: increased risk associated with use for > or = 10 years. " *Occup Environ Med.* 64 pp. 626-632.
32. Hirata. 2005. "Correlation between Maximum Temperature Increase and Peak SAR with Different Averaging Schemes and Masses", " *IEEE TRANSACTIONS ON ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY*, 2005.

33. Hong, Kwon JH, Choi HD, Cardis E. Lee AK1,. 2017. "Mobile phone types and SAR characteristics of the human brain,." *Phys Med Biol*, vol. 62(7), pp. 2741-2761, Apr 7 2017.
34. Hossmann, D.M.Hermann. 2003. "Effects of Electromagnetic Radiation of Mobile Phones on the Central Nervous System,." *Bioelectromagnetics* , vol. 24, 2003. pp. 49-62,.
35. n.d. *IT'IS Foundation*. <http://www.itis.ethz.ch/itis-for-health/tissue-properties/database/database-summary/>.
36. Jirik, Pekarek, L, Janout, V, and Tomaskova, H (2012). 2012. "Association between childhood leukaemia and exposure to power-frequency magnetic fields in Middle Europe". . *Biomed Environ Sci*. 25, pp.597-601.
37. Johnson, J.D. Evans, G.E. Robinson, M.R. Berenbaum. 2009. "Changes in transcript abundance relating to colony collapse disorder in honey bees (*Apis mellifera*),." 106, *PNAS* (2009), pp. 14790-14795.
38. Keshvari, M Kivento J. 2012. "Hand Effect on Head Specific Absorption Rate (SAR),." *in Radio and Antenna Days of the Indian Ocean (RADIO 2012)*.
39. Kleinerman, RA, Linet, MS, Hatch, EE, Wacholder, S, Tarone, RE, Severson, RK, Kaune, WT, Friedman, DR, Haines, CM, Muirhead, CR, Boice, JDJ, and Robison, LL (1997). 1997. "Magnetic field exposure assessment in a case-control study of childhood leukemia. ." *Epidemiology*. 8 pp. 575-583.
40. Kumar, G. Kuma,. 2010. "Report on cell tower radiation submitted to secretary Irisr Department of Telecommunication, ." *and New Delhi* .
41. Kumar, Geleta, Pandey, Sinwar,. 2021. "Adverse effects of 5th generation mobile technology on flora and fauna: Review study, Proceedings of the IOP conference series: Materials science and engineering, 1099,." *IOP Publishing* (2021), Article 012031.
42. Kurtsikidze Mtvarisa, Giorgi Ghvedashvili, Tamar Nozadze. 2023. "EVALUATION OF THE MOBILE PHONE ANTENNA ELECTROMAGNETIC FIELD THERMAL EFFECTS FOR THE NONHOMOGENEOUS CHILD MODEL BY USING COMPUTER SIMULATION", ." *Journal of Applied Electromagnetism. JAE, VOL. 25, NO.*
43. Lagiou, P, Tamimi, R, Lagiou, A, Mucci, L, and Trichopoulos, D (2002). 2002. "Is epidemiology implicating extremely low frequency electric and magnetic fields in childhood leukemia?. ." *Environ Health Prev Med*. 7, pp. 33-39. .

44. Leitgeb, N (2011). 2011. "Comparative health risk assessment of electromagnetic fields. ." *Wien Med Wochenschr.* 161 pp. , 251-262.
45. Lin. 2011. ""Electromagnetic fields in Biological Systems.,." *CRS Press, Taylor&Francis group, no. London New York, 2011.*
46. Liu, Li Y, Song X. Zhang C. 2016. ""SAR in human head model due to resonant wireless power transfer system,." *Technol Health Care, vol. 24 Suppl 2*, pp. 739-746,.
47. Lönn, A. Ahlbom, P. Hall, M. Feychting,. 2004. "Mobile phone use and the risk of acoustic neuroma, *Epidemiology* (2004),." pp. 653-659.
48. Maria, R. Scarfi Vijayalaxmi. 2014. ""International and National Expert Group Evaluations: Biological/Health Effects of Radiofrequency Fields,." *Int J Environ Res Public Health*, " vol. 11, no. 9, pp. 9376–9408.
49. Meena, A. Verma, C. Kohli, G.K. Ingle,. 2016. "Mobile phone use and possible cancer risk: Current perspectives in India,." *Indian Journal of Occupational and Environmental Medicine*, 20 (1) (2016), p. 5 p.5.
50. Meng, Li BP. Xu LS1,. 2009. ""Effects of dielectric values of human body on Specific Absorption Rate (SAR) following 800 MHz radio frequency exposure to ingestible wireless device,." *Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc, vol. 2009*, pp. 5060-5073.
51. MMF/GSMA. 2008-2010. *"Developing a Thermal Exemptions Rationale for Low-Power Transmitters," 08.01.2008-30.09.2010.* . 01 08.
52. Morgan, de Salles AA, Han Y-Y, Herberman RB, Davis DL. Gandhi OP,. 2012. ""Exposure limits: The underestimation of absorbed cell phone radiation, especially in children,." *Electromagn Biol Med.*, vol. 31, , 2012. pp. 34–51.
53. Murray, Cecil D. 1926. "The Physiological Principle of Minimum Work: I. The Vascular System and the Cost of Blood Volume." *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 12 (3): pp. 207–214.
54. Nadimikeri, M.Pramod Kumarb, G.Sreenivasuluc T.Lakshmi Prasadb B.Lakshmannad K.Nagalaksmie M.Madakkaf,. 2023. "„Mobile phone and base stations radiation and its effects on human health and environment: A review“,." *Sustainable Technology and Entrepreneurship, Volume 2, Issue 2, 2023, 100031* .
55. Naghdi, Hamidreza Hemmati, Majid Asadi-Samani, Mahmoud Bahmani. Mosa Moradi,. 2016. ""Effect of Ultra High Frequency Mobile Phone Radiation on Human Health,." *Electron Physician*, vol. 8(5), pp. 2452–2457.

56. Niño, Halonen P, Kuusela T, Laitinen T, Länsimies E, Hartikainen J, Hietanen M, Lindholm H. Tahvanainen K,. 2004. "Cellular phone use does not acutely affect blood pressure or heart rate of humans,." *Bioelectromagnetics.*, vol. 25(2), pp. 73-83.
57. Nozadze Tamar, Mtvarisa Kurtsikidze, Veriko Jeladze, Giorgi Ghvedashvili. 2022. "HAND INFLUENCE ON THE MOBILE PHONE ANTENNAS' MATCHING TO THE FREE SPACE (Selected from CEMA'22 Conference)". *Journal of Applied Electromagnetism. JAE, VOL. 24, NO. 2, 2022* pp. 1-8,.
58. Panagopoulos, E.D. Chavdoula, I.P. Nezis, L.H. Margaritis ,. 2007. "Cell death induced by GSM 900-MHz and DCS 1800-MHz mobile telephony radiation Mutation Research Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis, 626 (1–2) (2007), pp." pp. 69-78,.
59. Paulides, E Neufeld, A Christ, N Kuster, G C van Rhoon J F Bakker,. 2011. "Children and adults exposed to electromagnetic fields at the ICNIRP reference levels:." *theoretical assessment of the induced peak temperature increase,* *Phys. Med.Bio,* vil.56, pp 4967-4989.
60. Razmadze. 2009. " Investigation of Electromagnetic Field Exposure of Human Body.: . ." *Tbilisi State University, 2009.*
61. Santomaa, Kuster N. Drossos A,. 2000. "The dependence of electromagnetic energy absorption upon human head tissue composition in the frequency range of 300–3000 MHz,." *(IEEE) Trans Microwave Theory Tech., 2000.* pp. 1988–1995,.
62. Sharma, review, Lamba. 2017. "Source and effect of mobile communication radiation on human health *Advances in Wireless and Mobile Communications*, 10 (3) (2017),." pp. 423-435.
63. Sharma, Singh, Kohli, Batish. 2009. "Mobile phone radiation inhibits vignaradiata (mung bean) root growth by inducing oxidative stress",. *Science of The Total Environment*, 407 (21) (2009), pp.5543-5547.
64. SHUMEI, CHRISTINE M. ZELLER, NICHOLAS V. REO, ROGER M. SIERVOGEL W. CAMERON CHUMLEA,. 1999. "Total body water data for white adults 18 to 64 years of age:The Fels Longitudinal Study,." *Kidney International*, vol. 56, , 1999. pp. 244–252.
65. Silva, Gabriel Anzaldi,. 2007. "Initial Analysis of SAR From a Cell Phone Inside a Vehicle by Numerical Computation,." *IEEE TRANSACTIONS ON BIOMEDICAL ENGINEERING*, vol. 54, no. 5,.

66. Soja, B. Kunsch, M. Gerzabek,. 2003. "Growth and yield of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) and corn (*Zea mays* L.) near a high voltage transmission line,." *Bioelectromagnetics*, 24 (2003), pp. 91-102.
67. Summers-Smith. 2003. " The decline of the house sparrow: , 96 (2003), ." pp.439-446.
68. Surendran, N.A. iddiqui, P. Mondal, A. Nandan. 2020. ""Repercussion of electromagnetic radiation from cell towers/mobiles and their impact on migratory birds Advances in air pollution profiling and control",." *Springer, Singapore* (2020).
69. Swerdlow, AJ, Feychting, M, Green, AC, Leeka Kheifets, LK, and Savitz, DA (2011). 2011. "" Mobile phones, brain tumors, and the interphone study: where are we now? ." *Environ Health Perspect.* 119, pp.1534-1538.
70. Taye, M.K. Deka, A. Rahman, M. Bathari. 2017. " "Effect of electromagnetic radiation of cell phone tower on foraging behaviour of Asiatic honey bee, *Apis cerana* ." *F. (Hymenoptera: Apidae) Journal of Entomology and Zoology Studies*, 5 (2017), pp. 1527-1529.
71. Volkow, Tomasi D, Wang GJ, et al. 2011. "Effects of cell phone radiofrequency signal exposure on brain glucose metabolism." *JAMA* 2011; 305(8): pp. 808–813.
72. WHO. 2023. <http://www.who.int/peh-emf/en/>. [Online].
<http://www.mmfaio.org/public/>.
73. —. n.d. *World Health organization*.

ცხრილების ნუსხა

ცხრილი 4.1.1. ქსოვილის პარამეტრები 2100 მგჰც სიხშირეზე-----	111
ცხრილი 4.1.2. ქსოვილის პარამეტრები 3700 მგჰც სიხშირეზე-----	115

სურათების /დიაგრამების/გრაფიკების ნუსხა

სურათი 1. ელექტრომაგნიტური გამოსხივების სპექტრი-----	12
სურათი 2. კომპიუტერული მოდელის აგების პროცესი და კავშირი ექსპერიმენტს, სიმულაციასა და თეორიას შორის-----	18
სურათი 2.1. ელექტრული და მაგნიტური ველის ვექტორული კომპონენტების პოზიცია Yee სივრცითი ბადის ერთეულ კუბურ უჯრედზე.-----	40
სურათი 2.2. Yee ალგორითმის სივრცე-დროის დიაგრამა ერთგანზომილებიანი ტალღის გავრცელების მაგალითზე.-----	41
სურათი 3.1.1. პროგრამის კომპონენტები-----	46
სურათი 3.1.2. იმპორტირებული STL მოდელი-----	47
სურათი 3.1.3. იმპორტირებული XFDTD მოდელი-----	49
სურათი 3.1.4. თავის მოდელის კვეთები სხვადასხვა სიბრტყით-----	49
სურათი 3.1.5. თავის მოდელის მოცულობითი სურათი: ა) კანი, ბ) "გამორთულია" კანი, კუნთები-ძვლები, გ) ძვლოვანი -ხტილოვანი სისტემა და თვალეები-----	49
სურათი 3.1.6. სხვადასხვა ტიპის ობიექტები: ბრუნვითი სხეული, Pipe,Tube, წვრილი მავთული, მეტალის ფირფიტა-----	50
სურათი 3.2.1. ნივთიერებათა ბაზა-----	86
სურათი 3.2.2. აღზნების ფორმები-----	87

სურათი 3.2.3. თერმული ძრავა-----	88
სურათი 3.3.1. თავის მოდელი 3D ვიზუალიზატორში: ა) სრული; ბ) სიბრტყით წაკვეთილი-----	90
სურათი 3.3.2. იზოწირები და ნივთიერებათა კონტურები: ა) იზოწირები; ბ) SAR და ნივთიერებათა კონტურები-----	91
სურათი 3.3.3. ტემპერატურის პირველადი განაწილება-----	92
სურათი 3.3.4. ტემპერატურის ცვლილება ბაზური განაწილებიდან-----	92
სურათი 4.1.1. ადამიანის მოდელები „Virtual Population“-----	99
სურათი 4.1.2. ქალის „Ella“ (ა) და ბავშვის „Thelonious“ სამგანზომილებიანი (3D) მოდელების ფიზიკური მონაცემები (ბ). -----	100
სურათი 4.1.3. სხვადასხვა სიბრტყეში ქალის „Ella“ დისკრეტული თავის არე-----	100
სურათი 4.1.4. სხვადასხვა სიბრტყეში ბავშვის „Thelonious“ დისკრეტული თავის არე-----	100
სურათი 4.1.4.1. შექმნილი ხელის მოდელი Hand 1- პოზიციით, სხვადასხვა რაკურსით.	
სურათი 4.1.4.2. შექმნილი ხელის მოდელი Hand 2- პოზიციით, სხვადასხვა რაკურსით.	
სურათი 4.1.4.3. შექმნილი ხელის მოდელი ტელეფონის მოდელთან ერთად Hand 1 და Hand 2- პოზიციით-----	101
სურათი 4.1.4. 3D გეომეტრიები: ზრდასრული ადამიანის-Ella თავის მოდელის, მობილური ტელეფონის ხელთან ერთად ა) hand 1, ბ) hand 2-----	104
სურათი 4.1.5. 3D გეომეტრიები: ბავშვის თავის მოდელის, მობილური ტელეფონის : ა) მხოლოდ ტელეფონი; ბ) ხელთან ერთად-----	105
სურათი 4.1.6. ქალის დისკრეტული თავის მოდელი წარმოდგენილი სხვადასხვა სიბრტყეში, მობილური ტელეფონთან ერთად. ა) Hand 1; ბ) Hand 2-----	105
სურათი 4.1.7. დისკრეტული მოდელი ბავშვის თავის მობილურ ტელეფონთან ერთად: ა) ხელთან ერთად სხვადასხვა სიბრტყეში; ბ) მხოლოდ ტელეფონი.-----	106
სურათი 4.2.1. ტელეფონის მოდელი დიპოლური ანტენით: ა) 2100 მგჰც და ბ) 3700მგჰც სიხშირეებისათვის.-----	117
სურათი 4.2.2. სიხშირული მახასიათებელი დიპოლური ანტენისათვის: ა) ტელეფონი -ხელი; ბ) თავის მოდელი-ხელი სისტემა (2100 მგჰც სიხშირე).-----	118

სურათი 4.2.3. სიხშირული მახასიათებელი დიპოლური ანტენისათვის: ა) ტელეფონი-ხელი; ბ) თავის მოდელი-ხელი სისტემა (3700 მგჰც სიხშირე).-----	119
სურათი 4.2.4. ადამიანის მოდელისათვის მნიშვნელობები S11-კოეფიციენტის 'თავი-ანტენა-ხელი' კონფიგურაციისას: ა) 2100 და ბ) 3700 (მგჰც) სიხშირეებზე.-----	121
სურათი 4.2.5. შორი ველის დიაგრამა: ა) ტელეფონი მხოლოდ; ბ) Hand 1, გ) Hand 2 (2100 მგჰც სიხშირეზე).-----	121
სურათი 4.2.6. შორი ველის დიაგრამა თავის ზემოქმედების გათვალისწინებით: ა) თავი მხოლოდ ტელეფონთან ერთად; ბ) Hand 1, გ) Hand 2 (2100 მგჰც სიხშირეზე).-----	122
სურათი 4.2.7. დიპოლური ანტენის სხვადასხვა დაშორებებისათვის, თავი-ანტენა-ხელი კონფიგურაციისას ემ ველის მნიშვნელობები: ა) 2100 მგჰც, ბ) 3700 მგჰც სიხშირეებზე.-----	123
სურათი 4.2.8. თავი-ანტენა-ხელი კონფიგურაციისას სრული გადასხივებული სიმძლავრის მნიშვნელობები: ა) 2100 მგჰც და ბ) 3700 მგჰც სიხშირეებზე, ნორმირებულია 1ვატ- სიმძლავრეზე.-----	124
სურათი 4.2.9. ადამიანის თავის, ხელის მოდელებში SAR განაწილება: ა) მხოლოდ თავი; ბ) ხელით Hand 1; გ) ხელით Hand 2 (2100 მგჰც და 3700 მგჰც სიხშირეები).-----	125
სურათი 4.2.10. 10გSAR მნიშვნელობები: ა) თავის მოდელში; ბ) ხელის ქსოვილებში (2100 მგჰც სიხშირეზე; SAR- ნორმირებულია 1ვატ სიმძლავრეზე).-----	126
სურათი 4.2.11. 10გSAR მნიშვნელობები: ა) თავის მოდელში; ბ) ხელის ქსოვილებში (3700 მგჰც სიხშირეზე; SAR-ნორმირებულია 1ვატ სიმძლავრეზე). -----	127
სურათი 4.2.12. 10გSAR-ის S11- ზე დამოკიდებულება: თავის მოდელისათვის ა) 2100 მგჰც, ბ) 3700 მგჰც სიხშირეებისათვის.-----	129
სურათი 4.3.1. მობილური ტელეფონის მოდელი დიპოლური ანტენით: ა) 2100 მგჰც და ბ) 3700მგჰც სიხშირეები.-----	132
სურათი 4.3.2. დიპოლური ანტენის სიხშირული მახასიათებელი ა) 2100 მგჰც და ბ) 3700 მგჰც სიხშირეები.-----	133

სურათი 4.3.3. S11-ის მნიშვნელობები „თავი-ანტენა-ხელი“ სისტემისათვის; ა) 2100მგჰც, ბ) 3700მგჰც სიხშირეები.-----	134
სურათი 4.3.4. ანტენის შორი ველის დიაგრამა: ა) ხელის გარეშე, ბ) ხელის გათვალისწინებით (თავთან ერთად 2100 მგჰც სიხშირეზე).-----	135
სურათი 4.3.5. ანტენის შორი ველის დიაგრამა: ა) ხელის გარეშე, ბ) ხელის გათვალისწინებით (თავთან ერთად 3700 მგჰც სიხშირეზე).-----	135
სურათი 4.3.6. თავი-ანტენა-ხელი სისტემისთვის ემ ველის მნიშვნელობები: ა) 2100მგჰც და ბ) 3700მგჰც სიხშირეებზე (დიპოლური ანტენის სხვადასხვა მდებარეობისთვის).-----	136
სურათი 4.3.7. თავი-ანტენა ხელი სისტემისთვის სრული გადასხივებული სიმძლავრის მნიშვნელობები: ა) 2100მგჰც და ბ) 3700მგჰც სიხშირეებზე; ნორმირებული არის 1ვატ სიმძლავრეზე.-----	137
სურათი 4.3.8. 10გSAR განაწილება ხელში და თავში : ა) ტელეფონი მხოლოდ თავთან ერთად, ბ) ტელეფონი ხელით (2100 მგჰც სიხშირე)-----	138
სურათი 4.3.9. 10გSAR განაწილება ხელში და თავში: ა) ტელეფონი მხოლოდ თავთან ერთად, ბ) ტელეფონი ხელით (3700 მგჰც სიხშირე)-----	138
სურათი 4.3.10. 10გ SAR მნიშვნელობები ა) თავში, ბ) ხელის ქსოვილებში (2100 მგჰც სიხშირე. SAR ნორმირებული არის 1 ვატ სიმძლავრეზე).-----	139
სურათი 4.3.11. 10გ SAR მნიშვნელობები: ა) თავში, ბ) ხელის ქსოვილებში (3700 მგჰც სიხშირე; SAR ნორმირებული 1ვატ სიმძლავრეზე). -----	140
სურათი 4.3.12. დამოკიდებულება 10გ SAR-ის S11-ზე თავის მოდელისთვის: ა) 2100 მგჰც, ბ) 3700 მგჰც სიხშირეებისას.-----	141

აბრევიატურები

IEEE - ელექტრული და ელექტრონული ინჟინერიის ინსტიტუტი

AGC - ავტომატური გაძლიერების კონტროლი

FCC - კომუნიკაციების ფედერალური კომისია

Wi-Fi - უკაბელო ქსელის ტექნოლოგია, რომელიც საშუალებას აძლევს კომპიუტერებსა და სხვა მოწყობილობებს შორის კომუნიკაციას

5G - მეხუთე თაობის მობილური ქსელი

FDTD - დროით არეში სასრული სხვაობების მეთოდი

SAR - შთანთქმის კუთრი კოეფიციენტი

S11 - არეკვლის კოეფიციენტი

ემ - ელექტრომაგნიტური

EM - ელექტრომაგნიტური

EMF - ელექტრომაგნიტური ველები

RF - რადიოსიხშირული

MW - მიკროტალღური

Patch ანტენა - ბრტყელ-ფირფიტოვანი ანტენა

მგჰც - მეგაჰერცი

გჰც - გიგაჰერცი

WHO - ჯანმრთელობის მსოფლიო ორგანიზაცია

IARC - კიბოს კვლევის საერთაშორისო სააგენტო

ICNIRP - არამაიონიზებელი რადიაციისგან დაცვის საერთაშორისო კომისია

MMF - მობილურის მწარმოებელთა ფორუმი

ETSI - ევროპული ტელეკომუნიკაციების სტანდარტების ინსტიტუტი

UV - ულტრაიისფერი სხივები

Abbreviations

IEEE - Institute of Electrical and Electronics Engineers

AGC - Automatic Gain Control

FCC - Federal Communications Commission

Wi-Fi is a wireless network technology that enables communication between computers and other devices

5G - Fifth generation mobile network

FDTD - Finite-Difference Time-Domain method

SAR - Specific Absorption Rate

S₁₁ - reflection coefficient

EM - electromagnetic

EMF - electromagnetic fields

RF - radio frequency

MW - microwave

Patch Antenna - flat plate antenna

MHz - megahertz

GHz - gigahertz

WHO - World Health Organization

IARC - International Agency for Research on Cancer

ICNIRP - International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection

MMF - Mobile Manufacturers Forum

ETSI - European Telecommunications Standards Institute

UV - ultraviolet rays

