

ივანე ჯავახიშვილის სახელობის თბილისის სახელმწიფო უნივერსიტეტი

ზუსტ და საბუნებისმეტყველო მეცნიერებათა ფაკულტეტი

ფიზიკის დეპარტამენტი



თამარ ნოზაძე

საკომუნიკაციო სიხშირეების გამოსხივების ზეგავლენის შესწავლა

ადამიანზე სხვადასხვა ფიზიკურ პირობებში

სადისერტაციო ნაშრომი შესრულებულია ფიზიკის დოქტორის აკადემიური

ხარისხის მოსაპოვებლად

სამეცნიერო ხელმძღვანელები:

ფიზ. მათ. მეცნ. დოქტორი, ემერიტუს პროფ.

რევაზ ზარიძე

სამეცნიერო თანახელმძღვანელი:

ფიზიკის დოქტორი

ვერიკო ჯელაძე

Ivane Javakishvili Tbilisi State University

Faculty of Exact and Natural Sciences

Department of Physics



Tamar Nozadze

The study of the communication frequencies radiation influence on a human in a different physical conditions

The thesis work is performed to obtain a PhD degree in Physics

Scientific supervisors:

Doctor of Phys-Math Sciences. Emeritus Professor.

Doctor of Physics

Revaz Zaridze

Veriko Jeladze

2018

მადლობა

მინდა პატივისცემა გამოვხატო და მადლობა გადავუხადო ჩემს ხელმძღვანელებს ემერიტუს პროფ. რევაზ ზარიძესა და ფიზიკის დოქტორ ვერიკო ჯელაძეს სამეცნიერო თანამშრომლობისთვის; ასევე ფიზიკის დოქტორებს ვასილ ტაბატაძეს, ივანე პეტოევს და მიხეილ პრიშვინს მათი თანადგომისათვის.

ფინანსური მხარდაჭერისათვის მადლობას ვუხდით შოთა რუსთაველის ეროვნულ სამეცნიერო ფონდს, რომლის გრანტის YS15_2.12_56, „EM დასხივების ზემოქმედების შესწავლა ადამიანზე მცირე და დიდმასშტაბიან სცენარებში“ (17.12.2015-17.12.2017 წწ) ბაზაზეც შესრულდა ჩემი სადისერტაციო ნაშრომი;

ასევე, თსუ-ს ზუსტ და საბუნებისმეტყველო მეცნიერებათა ფაკულტეტს ჩემი სამეცნიერო კონფერენციებში მონაწილეობის დაფინანსებისთვის.

თამარ ნოზაძე

თბილისი, 2018 წ.

ანოტაცია

მობილური ტელეფონების და სხვა უსადენო საკომუნიკაციო მოწყობილობების მზარდი გამოყენების გამო და რადგან ელექტრომაგნიტური (ემ) ველის გამომსხივებელი უშუალო სიახლოვესაა მომხმარებელთან, დღეისათვის მეტად აქტუალურია მათ მიერ გამოსხივებული ემ ველების ადამიანზე ზეგავლენის გამოკვლევა. როგორც ცნობილია, მობილური ტელეფონით კომუნიკაციისას, მის მიერ გამოსხივებული ემ ველის დიდი ნაწილი შთაინთქმება ადამიანის თავისა და ხელის ქსოვილების მიერ, რაც გავლენას ახდენს მობილური კავშირის ხარისხზე. თანამედროვე “სმარტფონებს“ გააჩნიათ ფუნქცია ავტომატურად გაზარდონ გამოსხივების სიმძლავრე საბაზო სადგურთან საიმედო კავშირის მისაღწევად. ცნობილია, რომ ნებისმიერი გამრბენი ტალღა ფორმირდება გამომსხივებლის „ახლო“ ზონაში, რომელიც რამოდენიმე ტალღის სიგრძის ზომისაა. წარმოდგენილ კვლევაში გამოსხივების ფორმირებაში მონაწილეობს ძირითადად ადამიანის ხელი და თავი. ამის გამო ადამიანის თავის მახლობლად ფორმირდება პულსირებადი, მაღალი მნიშვნელობის მდგარი რეაქტიული ემ ველი. ამ ველის სახე და მნიშვნელობა ელექტროდინამიკაში ხასიათდება გამომსხივებლის „შეთანხმებით“ თავისუფალ გარემოსთან, ანუ, S11 კოეფიციენტით. ეს კი მნიშვნელობით დამოკიდებულია მოსაუბრის ხელის, თითების და თავის ურთიერთ პოზიციაზე. მობილური ტელეფონის მწარმოებლები მისი წარმოების და ტესტირების დროს მხედველობაში არ იღებენ ამ მნიშვნელოვან ფაქტორს.

ამიტომ, წარმოდგენილი კვლევის მიზანია დეტალურად გამოვიკვლიოთ თუ რა ზეგავლენას ახდენს ხელისა და თითების სხვადასხვა კონფიგურაცია-პოზიცია ტელეფონის გამოსხივების პარამეტრზე (S11 კოეფიციენტზე), ანტენის თავისუფალ სივრცესთან შეთანხმებაზე, და ასევე დავადგინოთ კორელაცია ტელეფონის ანტენის შეთანხმების პარამეტრსა და ადამიანის ქსოვილების მიერ შთაინთქმულ ემ ველის ენერჯიას (SAR) შორის. შევისწავლოთ, რა გავლენას ახდენს ზემოთ აღწერილი ეფექტები, ტემპერატურის მატების მნიშვნელობებზე ადამიანის თავის ქსოვილებში.

ემ ველის ბუნებიდან გამომდინარე, ასევე მნიშვნელოვანია გავითვალისწინოთ გარემო, სადაც იმყოფება ადამიანი და შევისწავლოთ მის სიახლოვეს არსებული ობიექტების ზეგავლენა; რადგან ადამიანი კომუნიკაციის დროს ხშირად იმყოფება შენობაში (ოთახში), ლიფტში, მანქანაში, მატარებლის ვაგონში და ა. შ. ამ პრობლემის გარშემო, არსებული კვლევები არასრულია. წარმოდგენილი დისერტაციის მიზანს წარმოადგენს ემ ზეგავლენის გამოკვლევა ადამიანზე ერთ-ერთ ასეთ შემთხვევაში, კერძოდ, როდესაც იგი იმყოფება მანქანაში. მანქანა დამზადებულია უმეტესად მეტალური მასალებისგან, რომელიც წარმოადგენს ამრეკლ ზედაპირს ემ ტალღების მიმართ; ამიტომ მობილური დიაპაზონის სიხშირეებზე, მანქანის სილრუე შეიძლება გახდეს რეზონატორი, ემ ველის დამაგროვებელი და გამაძლიერებელი. ამ შემთხვევაში მკვეთრად იზრდება მაღალი მნიშვნელობის საკუთარი ველები და შეიძლება საფრთხე შეუქმნას მანქანის შიგნით მყოფ ადამიანს.

კვლევის ამოცანაა, შევისწავლოთ მანქანის სიხშირული მახასიათებლები, ვიპოვოთ რეზონანსული სიხშირეები და შეფასდეს და შედარებულ იქნას ემ ველის ზეგავლენა ადამიანზე (SAR-ის მნიშვნელობების მიხედვით) როგორც რეზონანსული, ისე

არარეზონანსული სიხშირეებისთვის. კვლევა ითვალისწინებს დედამიწის, როგორც ამრეკლი ზედაპირის ზეგავლენას, რაც აგრეთვე წარმოდგენილ კვლევაში სიახლეა.

ადამიანზე რეალური ექსპერიმენტების ჩატარება არ არის ნებადართული, ამიტომ ემ გამოსხივების ზეგავლენის შესწავლის საშუალებას წარმოადგენს კომპიუტერული მოდელირება ადამიანის რეალისტური არაერთგვაროვანი მოდელის გამოყენებით, რომლის ფიზიკური ემ და თერმული პარამეტრები ცნობილია ექსპერიმენტული გამოცდების შედეგად. მობილური ტელეფონის ანტენის თავისუფალ სივრცესთან შეთანხმების შესასწავლად გამოყენებულ იქნა, მსგავს კვლევებში ფართოდ აპრობირებული, დროით არეში სასრული სხვაობების (FDTD) მეთოდი. ემ ზეგავლენის შესასწავლად ადამიანზე, რომელიც იმყოფება მანქანაში და მანქანის რეზონანსული თვისებების გამოსაკვლევად გამოყენებულ იქნა დამხმარე გამომსხივებლების მეთოდი (დგმ) და ადამიანის ერთგვაროვანი მოდელი გასაშუალოებული პარამეტრებით, რადგან FDTD მეთოდის გამოყენებისას შეზღუდული გვაქვს საკვლევი არის ზომა და ჩვენს ხელთ არსებული კომპიუტერული რესურსით შეუძლებელია ამოვხსნათ ემ ველის დიფრაქციის ამოცანა ასეთი დიდი მასშტაბის დასხივების სცენარის შემთხვევაში.

კვლევაში გამოყენებული იქნა 300, 450, 900, 1800, 1900, 3700 [მჰც] სტანდარტული საკომუნიკაციო სიხშირეები.

ჩატარებულმა კვლევებმა აჩვენა, რომ მობილური ტელეფონის სიახლოვეს ხელის (თითების) არსებობა, მისი სხვადასხვა პოზიცია ცვლის SAR-ის პიკურ მნიშვნელობებს ზრდასრული ადამიანის და ბავშვის თავის ქსოვილებში და ანტენის თავისუფალ სივრცესთან შეთანხმების პირობებს. დადგენილ იქნა, რომ ემ ველის მნიშვნელობა ახლო ზონაში, და შესაბამისად, SAR მკვეთრად დაამოკიდებული თავი-ანტენა-ხელის კონფიგურაციაზე და ანტენის თავისუფალ სივრცესთან შეთანხმების პირობებზე.

მანქანაში მყოფ ადამიანზე ემ დასხივების ზეგავლენის კვლევამ აჩვენა, რომ მანქანის ზედაპირი მოქმედებს როგორც რეზონატორი და აძლიერებს მობილური ტელეფონის ანტენის მიერ გამოსხივებულ ემ ველს; რის შედეგადაც SAR მნიშვნელობები რეზონანსისას დაახლოებით ერთი რიგით იზრდება ადამიანის თავის ქსოვილებში, ვიდრე ადამიანის ყოფნისას ღია სივრცეში. ამ კვლევის ჩასატარებლად შეიქმნა დგმ-ზე დაფუძნებული პროგრამული პაკეტი. მიღებული შედეგების შეჯამების საფუძველზე განმტკიცებულ იქნა ზოგადი რეკომენდაციები მობილური ტელეფონის გამოსხივების მავნე ზეგავლენის თავიდან ასარიდებლად. ასევე, ნაჩვენებია იქნა, რომ არსებული საერთაშორისო უსაფრთხოების სტანდარტები (SAR-ის დასაშვები ზღვრული მნიშვნელობები) საჭიროებს გადახედვას.

კვლევა ითვალისწინებს ადამიანზე ემ ველის გავლენით გამოწვეული მხოლოდ სითბური ეფექტების შესწავლას.

კვლევა დაფინანსებულია შოთა რუსთაველის ეროვნული სამეცნიერო ფონდის მიერ გრანტით: *YS15_2.12_56, „EM დასხივების გემოქმედების შესწავლა ადამიანზე მკირე და დიდმასშტაბიან სცენარებში“* (17.12.2015-17.12.2017 66).

Abstract

Due to the rapid increase usage of mobile phones and other wireless communications devices, and since the excitation source of the electromagnetic (EM) field is immediate proximity to the user, it is very important to study their influence on a human.

As it is known, during communication with mobile phone, human head and hand tissues absorb a big part of radiated energy, which affects on the quality of the mobile communication. The modern "smart phones" have the function, when the signal drops, automatically increase radiation power to reach reliable connection with the base station.

It is well known that any traveling wave is formed in the "near" zone of the excitation source, which takes size is several wavelengths dimensions. In this study, the human hand and head are involved in the formation of radiation. Because of this, the high value of the reactive pulsating standing EM field could be created near the human head.

The form and the value of this EM field in electrodynamics depends and characterized with how antenna (together with users head and hand) is matched to the free space, i.e., by the S11 coefficient. Which value depends on the user hand, fingers and head mutual position. Mobile phone manufacturers do not take into account this important factor during its production and testing.

Therefore, the goal of the proposed research is to investigate: how the hand and fingers different positions affects on the phone radiation parameter (S11 coefficient), which describes antenna matching to the free space; to define correlation between the parameters of the mobile phone antenna matching and the absorbed energy (SAR); and finally, how above mentioned effects on the temperature rise in the human head tissues.

Due to the nature of the EM field, it is also important to take into account the environment where the human located and study the effects of nearby surroundings; Because people are often in the building during the communication (in the room), in the elevator, inside the car, inside the train and so on. All this could influence on the communication quality. Existing researches on this problem are incomplete. The purpose of the presented dissertation thesis is to study EM exposure on human one of this case. Especially, when human with mobile phone is inside the car.

Cars are made from metallic materials reflects EM wave fields; therefore, on the some frequency of the mobile range, the car's metallic structure can become a resonator, due to EM field multiple reflection collects and amplifiers eigen field. In this case, Eigen field's values are increasing drastically and it may become dangerous for user inside the car.

The task of the proposed research is to study the car's frequency characteristics and estimate the SAR values difference in human's tissue on resonant and non-resonant frequencies. The novelty of our research is consideration of the Earth as a reflective surface, how it influences on the EM field inside the car.

Real experiments on humans are forbidden. So EM exposure investigation on human was carried out using computer modeling and human realistic nonhomogeneous models. Human's tissues physical and thermal parameters frequency dependence are known with

experimental measurements. The mobile phone antenna matching study to free space was carried out using the Finite-Difference Time-Domain (FDTD) method.

To study EM exposure on human inside the car it was used the Method of Auxiliary Sources (MAS) and the homogeneous human model with averaged parameters. Usage of FDTD method limits us the size of the calculation area. Since, it requests powerful computer resources to solve the EM-field diffraction task of such a large-scale exposure scenarios.

300, 450, 900, 1800, 1900, 3700 [MHz] standard communication frequencies were selected for numerical simulations.

The research showed that the presence of the different hand and finger position in the close vicinity of mobile phone changes the matching conditions and affect the peak SAR values in the adult's and child's head tissues. It has been also shown the presence of correlation between the SAR, the E-field values and S11 radiation parameter. The E-field values in near zone and respectively the peak SAR highly depends on the head-antenna-hand configuration and antenna matching conditions to the free space.

The EM exposure research on human inside the car showed that inside the car's metallic surface the resonance phenomena are observed. The semi-closed car metallic surface acts as a resonator and amplifies the EM field's value, radiated by the mobile phone. As a result, SAR values about one order higher in the human body tissues, compare to the case, when human is in the open space.

It was created the special program package, based on the MAS to investigate EM exposure influence on human located inside the car, considering the ground surface under the car.

Base on the obtained result, the general recommendations were presented to avoid the harmful effect of EM radiation on the human. It has also been shown that existing international safety standards (SAR's limitable margin values) need to be reviewed.

There are studied EM exposure thermal effects on human only.

This research was supported by Shota Rustaveli National Science Foundation grant: **YS15_2.12_56**. "*EM exposure study on human for small and large-scale scenarios*" (17.12.2015-17.12.2017 years).

სარჩევი

შესავალი	4
<i>§1. პრობლემის აქტუალობა და მისი თანამედროვე მდგომარეობა</i>	<i>4</i>
<i>§2. ლიტერატურული მიმოხილვა</i>	<i>10</i>
<i>§3. კვლევის მიზანი, სიახლე და მნიშვნელობა</i>	<i>16</i>
<i>§4. ამოცანის დასმა</i>	<i>19</i>
<i>§5. სადისერტაციო ნაშრომის მოკლე მიმოხილვა</i>	<i>21</i>
თავი I. კვლევაში გამოყენებული მათემატიკური მეთოდები	24
<i>§1.1. შესავალი</i>	<i>24</i>
<i>§1.2. დროით არეში სასრული სხვაობების (FDTD) მეთოდი მაქსველის განტოლებისათვის</i>	<i>25</i>
<i>§ 1.3. სითბური პროცესების რიცხვითი მოდელირება FDTD მეთოდით</i>	<i>29</i>
<i>§ 1.4. დამხმარე გამომსხივებლების მეთოდი (დგმ)</i>	<i>31</i>
<i>§1.5. I თავის დასკვნა</i>	<i>37</i>
თავი II. FDTD მეთოდით მობილური ტელეფონით გამოსხივებული ემ ველის ზეგავლენის შესწავლა ადამიანის არაერთგვაროვან მოდელზე ხელის სხვადასხვა პოზიციის გათვალისწინებით და ანტენის თავისუფალ სივრცესთან შეთანხმების გამოკვლევა	39
<i>შესავალი</i>	<i>39</i>
<i>§ 2.1. არაერთგვაროვანი მოდელების მომზადება</i>	<i>39</i>
<i>§ 2.2. FDTD მეთოდით მობილური ტელეფონის Patch ანტენით გამოსხივებული ემ ზეგავლენის შესწავლა ზრდასრული ადამიანისა და ბავშვის არაერთგვაროვან მოდელებზე ხელის სხვადასხვა პოზიციის გათვალისწინებით და მის გარეშე 900, 1900, 3700 მჰც სიხშირეებზე</i>	<i>44</i>
<i>§ 2.3. მობილური ტელეფონის დიპოლური ანტენის თავისუფალ სივრცესთან შეთანხმების დამოკიდებულება ხელის სხვადასხვა პოზიციაზე</i>	<i>49</i>
<i>შესავალი</i>	<i>49</i>
<i>§ 2.3.1. მობილური ტელეფონის ანტენის თავისუფალ სივრცესთან შეთანხმების გამოკვლევა</i>	<i>51</i>
<i>§2.4. II თავის დასკვნა</i>	<i>59</i>
თავი III. დამხმარე გამომსხივებლების მეთოდით მობილური ტელეფონის და საბაზო სადგურის ანტენის მიერ გამოსხივებული ემ ველის ზეგავლენის შესწავლა ადამიანის ერთგვაროვან მოდელზე მანქანაში	62
<i>§ 3.1. შესავალი</i>	<i>62</i>
<i>§3.2. დამხმარე გამომსხივებლების მეთოდის გამოყენება ადამიანზე ემ ზეგავლენის შესასწავლად მანქანაში</i>	<i>63</i>
<i>§3.3. მოდელების მომზადება გამოთვლებისათვის. პროგრამული პაკეტი</i>	<i>69</i>
<i>§3.4. განხილული მოდელები, მიღებული შედეგები და მათი ანალიზი</i>	<i>73</i>

§3.4.1. მობილური ტელეფონის გამოსხივების ემ ველის ზეგავლენის შესწავლა ადამიანის მოდელზე მანქანაში	74
§3.4.2. საბაზო სადგურის გამოსხივების ემ ველის ზეგავლენის შესწავლა ადამიანის მოდელზე მანქანაში	81
<i>§3.5.დამხმარე გამომსხიველების მეთოდის გამოყენება ადამიანზე ემ ზეგავლენის შესასწავლად მანქანაში დედამიწის ზედაპირის გათვალისწინების გარეშე.....</i>	<i>85</i>
<i>§3.6. III თავის დასკვნა.....</i>	<i>88</i>
დისერტაციის ძირითადი შედეგები გამოტანილი დასაცავად	89
რეკომენდაციები მობილური კავშირით გამოწვეული საფრთხეების თავიდან ასაცილებლად ...	93
გამოყენებული ლიტერატურა	95

აბრევიატურები და შემოკლებები

ემ - ელექტრომაგნიტური

RF - რადიოსიხშირული

MW - მიკროტალღური

FDTD - დროით არეში სასრული სხვაობების მეთოდი

დგმ - დამხმარე გამომსხივებლების მეთოდი

SAR - Specific Absorbtion Rate (შთანთქმის კუთრი კოეფიციენტი)

S11 - არეკვლის კოეფიციენტი

Patch ანტენა - ბრტყელ-ფირფიტოვანი ანტენა

მჰც - მეგაჰერცი

გჰც - გიგაჰერცი

WHO - World Health Organization (ჯანმრთელობის მსოფლიო ორგანიზაცია)

IARC - International Agency for Research on Cancer (კიბოს კვლევის საერთაშორისო სააგენტო)

ICNIRP - International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection

(არამაიონიზებელი რადიაციისგან დაცვის საერთაშორისო კომისია)

IEEE - Institute of Electrical and Electronics Engineers

AGC - Automatic Gain Control (ავტომატური გაძლიერების კონტროლი)

FCC - Federal Communications Commission (კომუნიკაციების ფედერალური კომისია)

MMF - Mobile Manufacturers Forum (მობილურის მწარმოებელთა ფორუმი)

შესავალი

§1. პრობლემის აქტუალობა და მისი თანამედროვე მდგომარეობა

პრობლემის აქტუალობა. მობილური ტელეფონები უკანასკნელი პერიოდის განმავლობაში თითოეული ჩვენთაგანის ცხოვრების განუყოფელ ნაწილად იქცა. მობილურ ტელეფონებში და სხვა სახის უსადენო კავშირის საკომუნიკაციო მოწყობილობებში კომბინირებულია კომპიუტერული შესაძლებლობები; რაც მოწყობილობას ადამიანისათვის აუცილებელ ნივთად აქცევს. "მასობრივმა მობილურიზაციამ" თითქმის მთელი მსოფლიო მოიცვა, მაგრამ ნებისმიერმა ტექნიკურმა პროგრესმა სიკეთესთან ერთად შეიძლება გამოიწვიოს უარყოფითი შედეგებიც. მობილური ტელეფონების მფლობელთა მზარდი რაოდენობის გამო, ბუნებრივად, გაჩნდა ინტერესი, როგორია მათი გავლენა ადამიანის ორგანიზმზე. მობილური ტელეფონები წარმოადგენენ რადიოსიხშირული (RF) და მიკროტალღოვანი (MW) ელექტრომაგნიტური (ემ) გამოსხივების წყაროებს. ემ ველის ბუნებრივ წყაროებს წარმოადგენენ მზე, ვარსკვლავები და სხვა. მათ მიერ შექმნილ ბუნებრივ ემ ფონს ადამიანის ორგანიზმი ადაპტირებულია. ემ ველის წყაროებს წარმოადგენენ ასევე ელექტრო მოწყობილობები, რომელთა მიერ გამოსხივებული ემ ველები იწვევენ ამ ბუნებრივი ემ ფონის „დაბინძურებას“. როგორც ვიცით, არსებობს სხვა სახის ემ გამოსხივების წყაროებიც (ელექტროტალღური ღუმელები, კომპიუტერები, ტელევიზორები, საბაზო სადგურები და მრავალი სხვა), მობილური ტელეფონები უშუალო სიახლოვეშია მომხმარებელთან. ამიტომ ძალზედ მნიშვნელოვანია მათი ემ გამოსხივების ზეგავლენის შესწავლა ადამიანზე, ემ ფონის გამოკვლევა, რომელსაც ქმნიან საბაზო სადგურები და სხვადასხვა სახის ანტენები. ასევე მნიშვნელოვანია, შევისწავლოთ ემ ველის ზეგავლენა ადამიანზე სხვადასხვა შემთხვევებში (მაგ. შენობაში, მანქანაში და ა.შ.) და გავითვალისწინოთ გარშემო არსებული ობიექტები. რამაც მნიშვნელოვნად შეიძლება შეცვალოს არსებული ბუნებრივი ემ ფონი.

დღეისათვის ასევე აქტუალურია მედიცინაში, კლინიკურ გამოკვლევებში გამოყენებული ემ ველების შესწავლა და უსაფრთხოების ნორმების დადგენა [1]. ბირთვული-მაგნიტური რეზონანსის მოვლენა საფუძვლად უდევს მაგნიტური რეზონანსით ადამიანის ორგანოების სკანირებას, რაც გამოიყენება, მაგალითად, ავთვისებიანი სიმსივნეების დიაგნოსტიკისათვის [2], [3].

ადამიანის სხეულის შემადგენლობაში შემავალი რეცეპტორები ახდენენ ელექტრული პოტენციალის გენერირებას (ნერვული იმპულსების გავრცელება ცოცხალ ორგანიზმში). ცოცხალი ორგანიზმებისათვის ბიოელექტრობა ძალიან მნიშვნელოვან როლს ასრულებს, რადგან ბიოლოგიური ქსოვილები და მის შემადგენლობაში შემავალი უჯრედების, უჯრედოვანი მემბრანების, ნერვული უჯრედების დიდი რაოდენობა ელექტრულად ძალიან მგრძობიარეა. ამიტომ ამ კუთხით დიდი ყურადღება ეთმობა შემდეგი საკითხების შესწავლას: ცოცხალი ორგანიზმების მიერ ემ ველის ენერჯის შთანთქმა, ნერვულ სისტემაზე ემ ველის ზეგავლენა, დაბალი სიხშირის ემ ველის ურთიერთქმედება უჯრედოვანი მემბრანების არხებზე, მოლეკულური ეფექტები.

თანამედროვე მდგომარეობა. კვლევები ზემოაღნიშნული მიმართულებით ადრეულ პერიოდში დაიწყო [4]. როგორც ცნობილია, RF და MW გამოსხივების გავლენა ცოცხალ ორგანიზმებზე ვლინდება პირდაპირი და ირიბი სითბური, ასევე არასითბური ეფექტების სახით. ბიოლოგიური ეფექტები დამოკიდებულია შიგა ემ ველზე. შიგა ემ ველის დახასიათებისთვის შემოტანილია სიდიდე შთანთქმის კუთრი კოეფიციენტი (SAR- Specific Absorption Rate, ვტ/კგ) [5], [6], [7], რომელიც გვიჩვენებს დროის ერთეულში, მასის ერთეულის მიერ შთანთქმულ ენერჯიას. იმის მიხედვით, თუ რა მასაზე და როგორ არის იგი დათვლილი, SAR შეიძლება იყოს ნერტილოვანი და სხვადასხვა მასაზე გასაშუალოებული. მთელი სხეულისთვის SAR-ის მნიშვნელობა შეიძლება გასაშუალოვდეს ქსოვილის ყველა ტიპის მნიშვნელობის გათვალისწინებით, ან შეიძლება ლოკალიზებული მნიშვნელობების დათვლა თითოეული ორგანოს ან სხეულის ნაწილისათვის და სხვა. SAR-ის განაწილების დადგენა და მისი მაქსიმალური

მნიშვნელობების გაზომვა ცოცხალი ორგანიზმებისათვის რთულია და ხშირად შეუძლებელიც. ამავე დროს, მაღალი სიხშირის (1გჰც და ზემოთ) შემთხვევაში ადამიანის ქსოვილების მაღალი შთანთქმის მნიშვნელობის გამო ამ სიხშირეებზე ველი თითქმის არ აღწევს ორგანიზმში და ხელსაწყოს მიერ გამოსხივებული ენერჯის შთანთქმა ძირითადად ხდება სხეულის ზედაპირზე. ცოცხალ სისტემებს აქვთ უნარი მოახდინონ გარე ქმედებების შედეგების კომპენსირება, ემ ველების ზემოქმედების ჩათვლით. კერძოდ, ფიზიოლოგიური კომპენსაცია ნიშნავს, რომ გარეშე ფაქტორებისაგან გამონვეული დაძაბულობა ორგანიზმში სრულად კომპენსირდება და ორგანიზმს შეუძლია განაგრძოს ნორმალური ფუნქციონირება. პათოლოგიური კომპენსაცია ნიშნავს, რომ გარე ქმედებები იწვევენ ფუნქციონალურ ცვლილებებს ორგანიზმში, რასაც შეიძლება სტრუქტურული ცვლილებებიც მოჰყვეს. საზღვარი ამ ორი ტიპის კომპენსაციას შორის მეტად რთული დასადგენია. უსაფრთხოების სტანდარტები ადგენენ ნორმას, რომლის ზემოთაც ადგილი აქვს ჯანმრთელობისთვის საშიშ, უკვე ცნობილ ეფექტებს. ბიოლოგიურ ეფექტებს კი შეუძლიათ გამოიწვიონ, ან არ გამოიწვიონ ჯანმრთელობისათვის საშიში ზემოქმედება. მეორეს მხრივ, როდესაც სხეული მოთავსებულია გარე საკმარისად მაღალი სიმძლავრის ემ ველში, ქსოვილში ტემპერატურა შეიძლება გაიზარდოს და გადააჭარბოს უსაფრთხოების ნორმას. არასითბური ეფექტების დროს ტემპერატურა არ იზდება და ადგილი აქვს რთული სახის ურთიერთობას ემ ველების და ცოცხალი უჯრედების მოლეკულებს შორის. არასითბურ ეფექტს მიეკუთვნება ემ ველის გავლენით გამონვეული ცვლილებები უჯრედულ დონეზე. გარე ველში მოთავსებულ უჯრედში იცვლება დადებითი და უარყოფითი იონების კონცენტრაციის ფარდობა, რაც ცვლის უჯრედში იონების ტრანსპორტირების პროცესს. ორივე სახის ეფექტებმა შეიძლება მოახდინონ როგორც დადებითი, ასევე უარყოფითი გავლენაც. რადიაციული მექანიზმის ნაწილია ემ ველის წყარო, რომელიც ასხივებს ემ ენერჯიას. ენერჯის ნაწილი აირეკლება, ხოლო ნაწილი შთანთქმება და გარდაიქმნება ბიოლოგიური სისტემის მიერ. შთანთქმული და არეკვლილი ენერჯიების ფარდობა დამოკიდებულია ბევრ პარამეტრზე: სიხშირეზე, სხეულის ზომამზე,

ტანსაცმელზე, კანის მდგომარეობაზე და სხვ. როგორც ზემოთ მოყვანილი მიმოხილვიდან ჩანს, საკითხი ემ გამოსხივების შესაძლო საფრთხის შესახებ არც თუ ისე ნათელია. არსებული უსაფრთხოების სტანდარტები საზღვრავენ ემ გამოსხივების დონეს ისეთი შემთხვევებისათვის, რომლებიც საფრთხეს უქმნიან ადამიანის ჯანმრთელობას, მაშინ როცა შეიძლება არსებობდეს რაიმე სხვა ბიოლოგიური ეფექტიც, ზემოქმედებაც, მაგრამ ის არ ითვლებოდეს ჯანმრთელობისათვის საშიშად.

რეკომენდაციები ძირითადად ეფუძნება შემდეგ წყაროებს: ჯანმრთელობის მსოფლიოს ორგანიზაცია (WHO) [8], რომლის რეკომენდაციებიც თავის მხრივ დაფუძნებულია არამაიონიზირებელი რადიაციისგან დაცვის საერთაშორისო კომისიის (ICNIRP-Commission on Non-Ionizing Radiation Protection) მიერ 1998 წელს გამოქვეყნებულ რეკომენდაციებზე 300 გჰც სიხშირემდე [9] და IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) სტანდარტებს [10], [11]. არსებულ რეკომენდაციებში მოცემულია ორი სახის შეზღუდვა: პირველი ძირითადი შეზღუდვები, რომლებიც ყოველთვის უნდა სრულდებოდეს; და მეორე შეზღუდვები, რომლებიც შეიძლება დარღვეულ იქნას მაშინ, როცა ძირითადი შეზღუდვების პირობები ძალაშია. ძირითადი (საბაზისო) შეზღუდვები გამოხატულია სიდიდეებით, რომლებიც ახასიათებენ სხეულს და არ იზომებიან, მაგალითად SAR-ით. მნიშვნელოვანია შევნიშნოთ, რომ უსაფრთხოების სტანდარტების დადგენისას მხედველობაში არ მიიღება შემთხვევა, როცა ადამიანი იმყოფება გარემოში. მაგ. ოთახში, მანქანაში და ა.შ.

მეორე ტიპის შეზღუდვები გამოხატულია სიდიდეებით, რომლებიც იზომებიან ადამიანის გარეშე, მაგალითად ელექტრული ველის ამპლიტუდის დონეები. არსებობს თეორიები და მოსაზრებები, რომლებიც ადგენენ კავშირს ამ ორი ტიპის სიდიდეებს შორის. დღეისათვის მეტ-ნაკლებად მეცნიერულად შესწავლილ ბიოლოგიურ ზემოქმედებად ითვლება სითბური ეფექტები და დღემდე არსებული რეკომენდაციები ძირითადად ეფუძნება სითბური ეფექტებით გამოწვეულ შეზღუდვებს. არსებული სტანდარტები არ ითვალისწინებენ ემ ველის ზემოქმედების არასითბურ ეფექტებს. ისინი გათვლილი არიან მხოლოდ სწრაფ ეფექტებზე და მხედველობაში არ იღებენ

შესაძლებლობას, რომ ხანგრძლივი დასხივების განმავლობაში, მომხმარებელი შეიძლება აღმოჩნდეს საფრთხის ქვეშ. ამ ორი ფაქტორის გათვალისწინება კი რთულდება იმითაც, რომ არ არსებობს საკმარისი, ცალსახად დამადასტურებელი, ემ ველის ზემოქმედების სტატისტიკა და საკმარისი ექსპერიმენტული მონაცემები. გასაყიდი მონაცემებისათვის შემუშავებულია SAR-ის დასაშვები ზღვრული მნიშვნელობები. SAR-ის დასაშვები ნორმებია: ევროპაში – 0.08 ვტ/კგ მთელი სხეულისათვის და 2 ვტ/კგ–ზე სხეულის ცალკეული ნაწილებისთვის (თავისთვის), გამოსხივების დოზიდან გამომდინარე, რომელსაც შთანთქავს სხეულის 10 გ ქსოვილი. აშშ-ის კომუნიკაციების ფედერალური კომისიის (FCC-Federal Communications Commission) მიერ SAR-ის ნორმები გამკაცრებულია, შესაბამისად, 0.08 ვტ/კგ და 1.6 ვტ/კგ, გამოსხივების დოზიდან გამომდინარე, რომელსაც შთანთქავს სხეულის 1 გ ქსოვილი. ევროპის მიერ არსებობს დაშვება SAR-ის მნიშვნელობის გაზრდაზე 4 ვტ/კგ-მდე სხეულის ზოგიერთი ნაწილისთვის, მაგალითად, ხელებისთვის. ევროპული ნორმატივი გამოიყენება ევროპაში, იაპონიაში, კორეაში, რუსეთში და სხვა ქვეყნებში. აშშ-ის ნორმები კი აშშ-ში, კანადაში, ავსტრალიაში, ახალ ზელანდიაში და სხვა ქვეყნებში.

ჩატარებული კვლევებით დადგენილია, რომ ურთიერთქმედება ემ ველსა და ბიოლოგიურ ობიექტს შორის დამოკიდებულია გამომსხივებლის მახასიათებლებზე: სიხშირეზე, მის მდებარეობასა და ორიენტაციაზე ობიექტის მიმართ [12] [13]; გამოსხივებული ტალღის ფორმასა და ემ ველის ამპლიტუდურ მნიშვნელობაზე [6] [14], ისევე როგორც ენერჯის შთანთქმისა და შენახვის უნარზე ბიოლოგიური ორგანიზმის მიერ [13]. ასევე მნიშვნელოვანია დაცემული ტალღის სიგრძის ბიოლოგიური სისტემის გეომეტრიულ ზომებთან თანაფარდობა. მობილური ტელეფონებით გამოსხივებული ემ ველის შთანთქმა ხდება ადამიანის თავის ქსოვილების, თვალის ბადურის, ასევე სხვა ორგანოების ქსოვილების მიერ. გამოსხივებული ემ ველი გავლენას ახდენს, როგორც უშუალოდ ცალკეულ ორგანოებზე, ასევე ადამიანის ნერვულ სისტემაზე და რამაც დროთა განმავლობაში

შეიძლება მაგნე ზეგავლენა შეიძლება მოახდინოს ადამიანის ორგანიზმის, როგორც ერთიანი მთლიანის გამართულ ფუნქციონირებაზე [15].

ჯანმრთელობის მსოფლიო ორგანიზაციის (WHO- World Health Organization) და კიბოს კვლევის მსოფლიო სააგენტოს (IARC- International Agency for Research on Cancer) მოთხოვნით, 2011 წელს საფრანგეთში, შეიკრიბა 14 ქვეყნის მეცნიერთა ჯგუფი, რათა შეეთვასებინათ პოტენციური საფრთხე ემ მონყობილობებისა, რომლებიც წარმოადგენენ RF, MW ემ ველის წყაროს. მათ გააკეთეს დასკვნა, რომ ისინი კვალიფიცირდებიან, როგორც 2B (კანცეროგენებად ადამიანებისათვის) [16], რაც ნიშნავს, რომ არსებობს რისკი იმისა, რომ მობილური ტელეფონის და სხვა სახის უსადენო კავშირის საკომუნიკაციო მონყობილობების მიერ გამოსხივებული ემ ველის გავლენა მნიშვნელოვნად ზრდის ადამიანებში კიბოს განვითარების რისკს. მეცნიერები ასევე შენიშნავენ, რომ მობილური ტელეფონების ტექნოლოგიის სწრაფი ცვლილება ართულებს შემდგომი დაკვირვებების წარმართვას [17], [18], [19].

არსებულმა კვლევებმა აჩვენა, რომ რადიოსიხშირის ემ ველი შეიძლება იყოს ადამიანში ონკოლოგიური დაავადებების განვითარების [20], ჰორმონული ცვლილებების [21], სისხლის შემადგენლობის დარღვევის მიზეზი [22]. ემ ველები ინვევენ ტვინში ნეირონების დაზიანებას, ენცეფალური ბარიერის დარღვევას [23] [24] [25] [26], უჯრედის დნმ-ის ცვლილებას [27]. საყურადღებოა ის ფაქტი, რომ ცხოველებზე ემ დასხივების კვლევებმა აჩვენა ტვინის კიბოს ეფექტები იმ შემთხვევაშიც კი, როდესაც დოზა ICNIRP-ით დადგენილ ფარგლებში იყო [28].

განსაკუთრებით საყურადღებოა მაგნე ზეგავლენა ბავშვებში. ისინი ადრეული ასაკიდანვე არიან RF გამოსხივების გავლენის ქვეშ. ემ გამოსხივებისათვის ტვინი წარმოადგენს „ძირითად სამიზნე ორგანოს“. ბავშვების ნერვული სისტემა და თავის ტვინი ჯერ კიდევ ჩამოუყალიბებელია, მცირედ განსხვავდება ქსოვილოვანი შემადგენლობა (შეიცავს შედარებით დიდი რაოდენობით წყალს, რომელსაც გააჩნია გამტარებლობა [29], [30], [31]); ბავშვის თავის ქალა გაცილებით თხელია, უფრო მეტად შეღწევადია ემ გამოსხივების მიმართ ვიდრე მოზრდილების და ამიტომ

უარყოფითი გავლენა ბავშვებში უფრო სერიოზული შეიძლება იყოს [32], [33], [34], [35]. კვლევებით დადგენილი იქნა ასევე, რომ ადამიანებს, რომლებიც დღის განმავლობაში მობილურ ტელეფონს იყენებენ 50 წუთზე მეტ ხანს, შეიძლება განუვითარდეთ ადრეული დემენცია, რომლის დროსაც სახეზეა უმაღლესი ფსიქიკური ფუნქციების: მეხსიერების, აზროვნების, ორიენტაციის, დასწავლის, მეტყველების, მსჯელობის მრავალფეროვანი აშლილობები [36], [37], [38].

“The EUROPAEM EMF Guideline 2016”-ის მიხედვით, მკაცრად დადასტურებულ იქნა, რომ ემ ველით ხანგძლივი დასხივება არის რისკ ფაქტორი ისეთი დაავადებების, როგორცაა ზოგიერთი სახის კიბო, ალცჰეიმერის დაავადება, თავის ტკივილი, დეპრესია, მამაკაცთა უნაყოფობა, ენერჯის სიმცირე და გრიპის მსგავსი სიმპტომები [36], [37], [38].

[19]-პრომაში შეჯამებულია რამოდენიმე სამეცნიერო ჯგუფის მიერ ბოლო პერიოდში მიღებული სამეცნიერო შედეგები. საიდანაც კარგად ჩანს, თუ რა გავლენის მოხდენა შეუძლია და რა პოტენციური საფრთხის მატარებელია ემ მოწყობილობების მიერ გამოსხივებული ემ ველი ადამიანის ჯანმრთელობაზე.

დღემდე, მიუხედავად უამრავი კვლევებისა ამ სფეროში, ემ ველის ადამიანზე ზეგავლენის საკითხი სრულად ჯერ კიდევ არ არის შესწავლილი. მეცნიერები განაგრძობენ კვლევას ამ მიმართულებით [14], რათა მივიღოთ დასაბუთებული პასუხები ამ საკითხზე.

§2. ლიტერატურული მიმოხილვა

ემ ველის გავლენით გამოწვეული შესაძლო ეფექტები, როგორც უკვე ავლნიშნეთ, იყოფა სითბურ და არასითბურ ეფექტებად. სითბური ეფექტებია, მაგალითად, ლოკალური გადახურება, ცოცხალი ქსოვილების შემადგენლობაში შედის წყალი, რომელსაც გააჩნია გამტარებლობა. ემ ველის ქსოვილში შეღწევისას, ველის ენერჯის დიდი ნაწილი სითბოდ გარდაიქმნება.

[39]-პრომაში შესწავლილია ადამიანის ჰეტეროგენური მოდელის RF ველით დასხივებით გამოწვეული სითბური ეფექტები FDTD მეთოდის გამოყენებით. მიღებულმა შედეგებმა ცხადყო, რომ 10გ მასის მოცულობაში გასაშუალოებული SAR-ის პიკური მნიშვნელობა და 1გ მასის მოცულობაში გასაშუალოებული SAR-ის პიკური მნიშვნელობა მნიშვნელოვნად აღემატება SAR-ის პიკურ მნიშვნელობას მთელი სხეულისათვის. აღმოჩნდა, რომ SAR-ის მნიშვნელობა დამოკიდებულია ანტენის სიგრძეზე, ორიენტაციაზე თავის მოდელის მიმართ და ასევე ბიოლოგიური სხეულის ზომაზე. კვლევა ტარდებოდა FDTD მეთოდის გამოყენებით 835მჰც და 1900მჰც სიხშირულ დიაპაზონში [40].

ემ ველის ენერჯის შთანთქმის შედეგად გამოწვეულის სითბური ეფექტების დროს ხდება ქსოვილის მოლეკულების გადატანითი და ბრუნვითი მოძრაობების კინეტიკური ენერჯის ზრდა და ამის შედეგად ქსოვილის გახურება. რაც დიდია SAR-ის პიკური მნიშვნელობა, მით დიდი შეიძლება იყოს ტემპერატურის ნაზრდი ადამიანის თავის ქსოვილებში [41]. ამასთან, ორგანიზმში მიმდინარე მეტაბოლური და თერმორეგულაციის მექანიზმები ცდილობენ შეინარჩუნონ ნორმალური ტემპერატურა ქსოვილში და იცავენ მას გადახურებისაგან (როგორც ცნობილია ბიოლოგიურ ორგანიზმს გააჩნია უნარი დროთა განმავლობაში გამოიმუშაოს იმუნიტეტი გარკვეული დაავადებების და ვირუსების წინააღმდეგ. მსგავსი მექანიზმი ჯერ-ჯერობით არ არსებობს ემ ველის გავლენით გამოწვეული ცვლილებების მიმართ).

მობილური ტელეფონის ანტენის მიერ გამოსხივებული ემ ველი დამოკიდებულია ტელეფონის პოზიციაზე ადამიანის თავის მიმართ [42], ხელის არსებობა ამცირებს SAR-ის მნიშვნელობას ადამიანის თავის ქსოვილში [43]. იმ შემთხვევაში, როდესაც ადამიანი იმყოფება მანქანაში, მანქანის ჩარჩო და ადამიანის მდებარეობა მანქანის შიგნით მნიშვნელოვან გავლენას ახდენს SAR-ის მნიშვნელობაზე ადამიანის თავში [44]. მატარებლის ვაგონის შიგნით რამოდენიმე აქტიური წყაროს მიერ შექმნილი ველის შესწავლამ (არ არის გათვალისწინებული ადამიანის არსებობა) აჩვენა, რომ ემ ველის მნიშვნელობა დამოკიდებულია წყაროს რაოდენობაზე, მათ ორიენტაციაზე ვაგონის

შიგნით [45]; როდესაც ადამიანი იმყოფება მანქანაში და კომუნიკაციისას მობილურ ტელეფონს იყენებს Bluetooth-ის საშუალებით, SAR-ის მნიშვნელობა ადამიანის თავში რამოდენიმეჯერ აღემატება ზღვრულ დასაშვებ მნიშვნელობას [46].

გამოყენებითი ელექტროდინამიკისა და რადიოტექნიკის ლაბორატორიის (თსუ) გუნდს, დიდი გამოცდილება გააჩნია ადამიანზე ემ ველის ზემოქმედების კომპიუტერული მოდელირებით კვლევაში. 1998 წელს ჯანდაცვის მსოფლიო ორგანიზაციამ (WHO) [47] მობილური კავშირგაბმულობის მონეობილობების მწარმოებლებისგან მოითხოვა სპეციალური ფორუმის ორგანიზება (MMF-Mobile Manufacturing Forum) [48] პრობლემის გამოსაკვლევად, რომელიც დაკავშირებულია ემ გამოსხივების ადამიანზე შესაძლო ნეგატიურ ზემოქმედებასთან. გამოყენებითი ელექტროდინამიკისა და რადიოტექნიკის ლაბორატორიის გუნდი, ამ კვლევებში მონაწილეობდა თითქმის 10 წლის მანძილზე [49]. გამოთვლებისას გამოიყენებოდა MRI სკანირების შედეგად მიღებული ადამიანის არაერთგვაროვანი მოდელები: პირველ ეტაპზე „visible human model“ და შემდეგ კაცის, ქალის და ბავშვის ანატომიური მოდელები. ეს მოდელები ცნობილია სახელით „Virtual Family“ [50], რომელსაც მსოფლიო მასშტაბით იყენებს მრავალი კვლევითი ჯგუფი. ქსოვილის ფიზიკური პარამეტრები [51,52] მიღებული იქნა დიდი რაოდენობა რიცხვითი გაზომვებით [53]. ასეთი არაერთგვაროვანი მოდელების გამოყენებისას, ემ ველის შთანთქმის ამოცანის ამოხსნა შესაძლებელი იყო მხოლოდ დროით არეში სასრული სხვაობების (FDTD) მეთოდის გამოყენებით. ამ მიზნით, გამოყენებითი ელექტროდინამიკისა და რადიოტექნიკის ლაბორატორიაში შეიქმნა სპეციალური კომპიუტერული პროგრამული პაკეტი FDTDLab, რომლის მეშვეობითაც განხორციელდა შესაბამისი კვლევები და გამოთვლილ იქნა ძირითადი მახასიათებლები: SAR და მაქსიმალური ტემპერატურის ნაზრდი თავის არეში.

შრომაში [54] ვრცლად არის აღწერილი დროით არეში სასრული სხვაობების (FDTD) მეთოდი, დამხმარე გამომსხივებლების მეთოდი და მათი ჰიბრიდული მეთოდები. აგრეთვე გამოსხივებული ემ ველის შეღწევა ისეთ რთულ გარემოში,

როგორცაა ადამიანის სხეული. შესწავლის საგანი იყო ადამიანის არაერთგვაროვანი მოდელი “Visible Human Model” წარმოდგენილი 0.5 მმ-ის სიზუსტით. კვლევის ძირითადი მიზანი და შედეგი იყო სპეციალური პროგრამული პაკეტის FDTDLab- ის შექმნა, რომლის დანიშნულებაა:

1. დასხივებული ემ ველის განაწილების პოვნა ადამიანის სხეულში.
2. ქსოვილში შთანთქმული ემ ველის ენერჯის გარდაქმნა სითბურ ენერჯიაში (SAR-ის განაწილების პოვნა),
3. ადამიანის სხეულში ემ დასხივების შედეგად გამოწვეული ტემპერატურის ცვლილების განსაზღვრა, თერმული ამოცანების ამოხსნა კომპლექსური სცენარებისათვის.

აღსანიშნავია, რომ შექმნილი პროგრამული პაკეტი FDTDLab, ჩვენი უნივერსიტეტის, კერძოდ ლაბორატორიის საკუთრებას წარმოადგენს. მისი ხარისხი გახდა მიზეზი ჩვენი ჯგუფი აქტიურად ჩაბმულიყო საერთაშორისო კვლევებში და შემდგომი გრანტების მიღებაში. იგი აქტიურად გამოიყენებოდა და გამოიყენება დღესაც ემ დასხივების ამოცანების ამოსახსნელად.

[55]-ში შესწავლილია ტემპერატურის ცვლილებასთან კორელაციის თვალსაზრისით SAR-ის გასაშუალოების საუკეთესო მასის შერჩევის მექანიზმი, რადგან ნერტილოვანი SAR-ის განაწილებას უმეტეს შემთხვევაში ჰქონდა ვიწრო პიკის სახე და სრულყოფილად არ ახასიათებდა ემ ენერჯის შთანთქმის პროცესს ქსოვილში. სწორედ ამიტომ განხილულია საკითხი, თუ რა სიდიდის გასაშუალოებული მასა (1გ თუ 10გ) უნდა იყოს მიღებული IEEE და საერთაშორისო სტანდარტად [56]. წარმოდგენილი კვლევის შესწავლის საგანი იყო დამკვეთების მიერ შემოთავაზებული მობილური ტელეფონების და აგრეთვე კავშირგაბმულობაში გამოყენებული საბაზო ანტენების მიერ გამოსხივებული ემ ველის ადამიანზე ზემოქმედების შესწავლა რეალურთან ახლო სცენარებში. კონკრეტულად, როდესაც ადამიანი იმყოფება კედელთან და ბორცვის მიმდებარედ. მაგრამ უნდა აღინიშნოს, რომ გამოთვლები ჩატარებულია მხოლოდ დაბალ სიხშირეებზე, არა უმეტეს 400 მჰც-სა, რადგან შეზღუდული

კომპიუტერული რესურსების გამო ეს საკითხი ვერ განვითარდა უფრო დიდი მასშტაბების სცენარების შესასწავლად და მაღალი სიხშირეების გასათვალისწინებლად. კვლევაში ასევე განხილულია FDTD მეთოდის ამონახსნის სიზუსტის საკითხი და აღნიშნულია, რომ ზოგიერთ ამოცანათა კლასისთვის საჭიროა უფრო ზუსტი მოდელი, რომელშიც არის გათვალისწინებული სისხლის მიმოქცევა და მის მიერ სითბოს გადატანა ქსოვილში კონვექციით.

[57]-ში განხილულია, სწორედ ეს ასპექტი სისხლის მიმოქცევის გათვალისწინება და FDTD Lab პროგრამული პაკეტის შესაძლებლობების გაფართოება, რომელიც გულისხმობს სისხლის მიმოქცევის გათვალისწინებას ტრადიციულ პენეს ბიო-სითბოს განტოლებებში და მის მოდიფიცირებას. მასში შემოთავაზებულია ახალი ალგორითმი სისხლძარღვთა სტრუქტურის აგებისა და კაპილარული სისხლის დინების მოდელირების, რაც უზრუნველყოფს სითბოს გადატანას ქსოვილში კონვექციით. ეს მოდელი საშუალებას გვაძლევს დანვრილებით შევისწავლოთ თერმული ეფექტი იმ სახით, რომელიც ახლოა ქსოვილში მიმდინარე პროცესთან, ვიდრე ტრადიციულ პენეს მოდელში. მიღებულმა გამოთვლებმა აჩვენა, რომ სტატიკურ მდგომარეობაში მაქსიმალური ტემპერატურები პირობით პენეს განტოლებასთან შედარებით ფაქტიურად იგივეა. მაგრამ მაქსიმალური ტემპერატურის განაწილება და მატება ემ დასხივების განმავლობაში გამოთვლილი მოდიფიცირებული ბიო-სითბოს განტოლების გათვალისწინებით მცირეა [58]. ასევე ნაჩვენებია, რომ SAR-ის ზრდისას მოდიფიცირებული მოდელის გათვალისწინებით ტემპერატურის მატება ასევე მცირეა. შემოთავაზებული ალგორითმის მიხედვით აგებული არტერიული და ვენური კაპილარულ სისხლძარღვთა სისტემა, სადაც საჭიროა არტერიიდან გამოსული სისხლი შედიოდეს ვენაში კაპილარების გავლით, დამოკიდებულია ადამიანის მოდელის დისკრეტიზაციაზე. ალგორითმის და რიცხვითი მეთოდის სიზუსტის შესამოწმებლად გამოთვლები ჩატარებულია გამარტივებულ მოდელზე - კუბზე, რიცხვითი და ანალიზური ამონახსნის შესადარებლად. უნდა აღინიშნოს, რომ შემოთავაზებული მიდგომა, ადამიანის მოდელის შემთხვევაში, შემოწმებულია

მხოლოდ მამაკაცის თავის მოდელზე 300 მჰც სიხშირეზე, რაც ემ დასხივებისას თბოცვლის მექანიზმის სრულ სურათს არ აჩვენებს და დიდი რაოდენობის მონაცემთა ანალიზის საშუალებას არ იძლევა. ასევე შესწავლილი იყო დამყარებული სითბური მოვლენები გამოწვეული დიპოლური, მონოპოლური, PIFA, IFA და Patch ანტენების გამოსხივების შედეგად. წარმოდგენილი იყო SAR-ისა და ტემპერატურის ნაზრდის მაქსიმალური მნიშვნელობები მამაკაცის თავის მოდელში და ყველა განხილული ანტენა შედარებული იყო დიპოლურ ანტენასთან. ასევე განხილული იქნა მონაცემთა მდგრადობის ამოცანა და ნაჩვენები იქნა, რომ ემ დასხივების მოდელირებისას გასათვალისწინებელია რამოდენიმე ისეთი ფაქტორი, რომელიც ადრე არ ითვლებოდა მნიშვნელოვნად [59]. მაგალითად, გამოთვლების შედეგები არასტაბილურია ანტენის პარამეტრების უმნიშვნელო ცვლილებების მიმართ: მიმართული გამოსხივების დიაგრამა გამოიწვევს ამონახსნის არასტაბილურობას ანტენის მდებარეობის მიმართ; რეზონანსის შემთხვევაში მაქსიმალური ტემპერატურის მატება მკვეთრად იზრდება; ხელის არსებობა მკვეთრად ცვლის გამოსხივების დიაგრამას და ტემპერატურის ნაზრდისთვის მიღებულ მნიშვნელობებს; სწორედ ამიტომ, მომხმარებლისათვის სასარგებლოა მობილური ტელეფონის გამოყენებისას აპარატის ადგილმდებარეობის ცვლილება.

[60]-ში გამოყენებულია ადამიანის სხვადასხვა არაერთგვაროვანი დისკრეტული მოდელები და მათში გათვალისწინებულია სისხლის მიმოქცევა, დასხივების მცირემასშტაბიან სცენარებში; ასევე გათვალისწინებულია ადამიანის გარშემო არსებული ობიექტების ზეგავლენა (კერძოდ, როცა ადამიანი იმყოფება შენობაში), დასხივების ფართომასშტაბიანი სცენარებში. ნაჩვენები იქნა, რომ ზოგიერთ შემთხვევაში, ტემპერატურის მატების მაქსიმალური მნიშვნელობები სისხლის მიმოქცევის გათვალისწინებისას შედარებით მცირეა. სისხლის მიერ სითბოს გადატანა-გადანაწილების ეფექტის გამო, ტემპერატურის მატება შიდა ქსოვილებისთვის, სისხლის მიმოქცევის გათვალისწინებისას უფრო მეტია. SAR-ისა და ტემპერატურის მატების

მნიშვნელობები ბავშვის მოდელისათვის უფრო მაღალია ზრდასრულ ადამიანთან შედარებით, ბავშვის სხეულის ზომების და ქსოვილების თიზიკური თვისებების გამო.

ფართომასშტაბიან სცენარებში დამხმარე გამომსხივებლების მეთოდით ადამიანზე ემ დასხივების ზემოქმედების კვლევამ, ოთახის კედლების სხვადასხვა გამჭვირვალობისას და ადამიანის მოდელის მდებარეობის ცვლილებისას აჩვენა, რომ ოთახის კედლების დაბალი გამჭვირვალობისას ($T=0.22$) ოთახში ფორმირდება მაღალი რეზონანსული ველი [61]. რეზონანსულ სიხშირეებზე ოთახის კედლების დაბალი გამჭვირვალობისას ($T=0.22$) ველის მნიშვნელობა ოთახში და ასევე SAR-იც ადამიანის თავში ერთი-ორი რიგით იზრდება. როცა ადამიანი იმყოფება თანჯარასთან, მასში შთანთქმული ველის ენერჯია მცირეა, ვიდრე ოთახის სიღრმეში მდებარეობისას.

§3. კვლევის მიზანი, სიახლე და მნიშვნელობა

ადამიანზე ემ დასხივების კვლევის ძირითად საშუალებას წარმოადგენს კომპიუტერული მოდელირება ადამიანის რეალისტური მოდელის გამოყენებით. მიუხედავად მიღებული შედეგების დიდი რაოდენობისა, ემ ველის ადამიანზე ზემოქმედების პრობლემა სრულად კვლავ გადაუჭრელი რჩება. არსებულ მონაცემებზე დაყრდნობით, შეუძლებელია შევადგინოთ სრულყოფილი რეკომენდაციები მობილური საკომუნიკაციო მოწყობილობების უსაფრთხო გამოყენებისათვის.

ემ ველის ზეგავლენა ადამიანზე ვლინდება სითბური და ბიოლოგიური ეფექტების სახით. ბიოლოგიური ეფექტების განხილვა წარმოადგენილი კვლევის საგანს არ წარმოადგენს, განიხილება მხოლოდ სითბური ეფექტები.

კვლევა დაფინანსებულია შოთა რუსთაველის ეროვნული სამეცნიერო ფონდის მიერ გრანტით: *YS15_2.12_56*, „*EM დასხივების ზემოქმედების შესწავლა ადამიანზე მცირე და დიდმასშტაბიან სცენარებში*“ (17.12.2015-17.12.2017 წწ).

ემ დასხივების ზეგავლენის შესასწავლად გამოიყენება ადამიანის რეალისტური არაერთგვაროვანი დისკრეტული მოდელები და ემ ზეგავლენის მოდელირება ხდება FDTD მეთოდით 900, 1900, 3700 მჰც სიხშირეებზე.

კვლევის მიზანი და სიახლეა მობილურის ანტენის თავისუფალ სივრცესთან შეთანხმების გამოკვლევა ხელის (თითების) სხვადასხვა პოზიციის და მობილურის (ხელთან ერთად) ადამიანის თავის მოდელიდან დაცილების სხვადასხვა მანძილების (1მმ, 10მმ, 20მმ) შემთხვევაში, ადამიანის თავის მახლობლად რეაქტიული ველის შესამცირებლად; გასათვალისწინებელია მოხმარებლის თავში შთანთქმული სიმძლავრის შეფასება ხელის (რომელსაც უჭირავს ტელეფონი) გათვალისწინებით და შედარებითი ანალიზის გაკეთება ხელის გარეშე შემთხვევებისთვის. რადგან ხელი, რომელსაც უჭირავს ტელეფონი შთანთქმავს ტელეფონის ანტენის მიერ გამოსხივებული ენერჯის ნაწილს. მნიშვნელოვანია ასევე მაქსიმალური შთანთქმის კოეფიციენტის (SAR) დამოკიდებულების შესწავლა მობილური ანტენის შეთანხმების პირობებზე (S11-კოეფიციენტი); არსებული რეკომენდაციების სრულყოფა-განმტკიცება მობილური ტელეფონის სწორად გამოყენებისთვის, რათა მინიმუმამდე იყოს დაყვანილი თავში შთანთქმული სიმძლავრის მნიშვნელობები.

ემ ველის ბუნებიდან გამომდინარე, ასევე მნიშვნელოვანია გავითვალისწინოთ გარემო, სადაც იმყოფება ადამიანი და შევისწავლოთ მის სიახლოვეს არსებული ობიექტების ზეგავლენა; რადგან ადამიანი კომუნიკაციის დროს ხშირად იმყოფება შენობაში (ოთახში), ლიფტში, მანქანაში, მატარებლის ვაგონში და ა. შ. ამ პრობლემის გარშემო, არსებული კვლევები არასრულია. წარმოდგენილი დისერტაციის მიზანს წარმოადგენს ემ ზეგავლენის გამოკვლევა ადამიანზე ერთ-ერთ ასეთ შემთხვევაში, კერძოდ, როდესაც იგი იმყოფება მანქანაში. FDTD მეთოდის გამოყენებისას შეზღუდული გვაქვს საკვლევი არის ზომა. ჩვენს ხელთ არსებული კომპიუტერული რესურსით შეუძლებელია გავითვალისწინოთ ადამიანის გარშემო არსებული ობიექტები; გამოსხივებული ემ ველის მრავალჯერადი არეკვლა, მაგალითად, მანქანის კედლების მიერ. არ არის გათვალისწინებული დიფრაქციისა და ინტერფერენციის მოვლენები მობილური ტელეფონის მომხმარებლის გარშემო არსებულ საგნებზე. ამ შემთხვევაში ემ დასხივების ზეგავლენის მოდელირება ხდება ადამიანის ერთგვაროვან მოდელზე უფრო ეფექტური დამხმარე გამომსხივებლების მეთოდის გამოყენებით.

კვლევაში გამოყენებული მძლავრი გამოთვლითი აპარატი, დამხმარე გამომსხივებლების მეთოდი (დგმ), საშუალებას გვაძლევს გამოვრიცხოთ ზემოთ ჩამოთვლილი ხარვეზები; განვიხილოთ ერთი ადამიანის მოდელი გასაშუალოებული პარამეტრებით (კუნთის, ძვლის, ცხიმის მიხედვით) და გავითვალისწინოთ მნიშვნელოვანი გარე ფაქტორები. გამოვიკვლიოთ შემთხვევა, როდესაც იგი იმყოფება არეში, რომელსაც გააჩნია ღია ნაწილი, მაგალითად, მანქანის ფანჯრები. იგულისხმება, რაც შეიძლება რეალურთან მიახლოებული სცენარის განხილვა.

ასევე კვლევის მიზანი და სიახლეა დამხმარე გამომსხივებლების მეთოდის გამოყენებით შევისწავლოთ მობილური ტელეფონის და საბაზო სადგურის ანტენის მიერ გამოსხივებული ემ ველის ზეგავლენა ადამიანზე, რომელიც იმყოფება მანქანაში და გამოვიკვლიოთ ემ ველის რეზონანსული თვისებები მანქანის შიგნით. სიახლეს წარმოადგენს დედამიწის, როგორც ამრეკლი ზედაპირის, გათვალისწინება ველის ფორმირების პროცესში. მოტივაცია წარმოდგენილი კვლევის არის ის, რომ ჩვენ ხშირად ვიყენებთ მობილურ ტელეფონს და სხვა საკომუნიკაციო მოწყობილობებს მანქანაში (მაგ. რაცია პოლიციის მანქანებში). როგორც ცნობილია, მანქანა დამზადებულია მეტალისაგან და სხვა გამტარი მასალებისგან; მობილური დიაპაზონის ზოგიერთ სიხშირეებზე ეს ნაწილობრივ ღია მეტალის სტრუქტურა იქცევა როგორც რეზონატორი აგროვებს და აძლიერებს საკომუნიკაციო მოწყობილობის ანტენის მიერ გამოსხივებულ ემ ველს. როდესაც მომხმარებელი მობილური ტელეფონით კომუნიკაციისას იმყოფება მანქანაში რეზონანსური ველის ამპლიტუდა შეიძლება გაიზარდოს, მეტალის ზედაპირიდან მრავალჯერადი არეკვლის შედეგად, რაც შეიძლება საშიში იყოს მანქანაში მყოფი ადამიანისათვის.

რიცხვითი ექსპერიმენტი ჩატარდა 300, 450, 900, 1800, 3700 მჰც საკომუნიკაციო სიხშირეებზე. (300, 450მჰც-რადიო კომუნიკაციის, 900-1900მჰც GSM ქსელის, 3700მჰც-მომავლში ასათვისებელი სიხშირე).

სამეცნიერო მნიშვნელობა ექსპერიმენტული გაზომვები ემ დასხივებისა ყველა კერძო შემთხვევებში ძვირი იქნებოდა და ზოგ შემთხვევაში საერთოდ შეუძლებელია.

კომპიუტერული მოდელირება ერთადერთი ხელმისაწვდომი საშუალებაა ადამიანზე ემ დასხივების შესაფასებლად. რადგან საქმე ეხება ადამიანის სხეულს, სადაც შეუძლებელია ემ მიმღები სენსორის მოთავსება. ემ პროცესების მოდელირების შესაძლებლობების გაფართოებას დიდი პრაქტიკული მნიშვნელობა აქვს. მნიშვნელოვანია ვიცოდეთ არის თუ არა გარემო, სადაც ვცხოვრობთ, უსაფრთხო ემ ფონის დაბინძურების თვალსაზრისით; დაცულია თუ არა უსაფრთხოების ნორმები მობილური ოპერატორების მიერ. წინამდებარე კვლევის ფარგლებში მიღებული შედეგები სასურველია გათვალისწინებული იქნას მობილური ტელეფონის მწარმოებელი კომპანიების და ასევე მომხმარებლების მიერ, რათა თავიდან იქნეს აცილებული შესაძლო უარყოფითი ეფექტები.

§4. ამოცანის დასმა

წინამდებარე სადისერტაციო ნაშრომი „საკომუნიკაციო სიხშირეების გამოსხივების ზეგავლენის შესწავლა ადამიანზე სხვადასხვა ფიზიკურ პირობებში“, შედგება პირობითად ორი ნაწილისაგან:

1) ემ გამოსხივების ზეგავლენის შესწავლისას ადამიანზე (საკვლევი არის მცირე ზომებისას) გამოიყენება ადამიანის რეალისტური არაერთგვაროვანი მოდელები, რომლის ფიზიკური ემ და თერმული პარამეტრები ცნობილია ექსპერიმენტული გაზომვების შედეგად. მობილური ტელეფონის ანტენის თავისუფალ სივრცესთან შეთანხმების შესასაწავლად გამოყენებულ იქნა, მსგავს კვლევებში ფართოდ აპრობირებული, დროით არეში სასრული სხვაობების (FDTD) მეთოდი. წარმოდგენილი კვლევის მიზანია დეტალურად გამოვიკვლიოთ, თუ რა ზეგავლენას ახდენს ხელისა და თითების სხვადასხვა კონფიგურაცია-პოზიცია (ასევე მობილურის (ხელთან ერთად) ადამიანის თავის მოდელიდან დაცილების სხვადასხვა მანძილები (1მმ, 10მმ, 20მმ)) ტელეფონის გამოსხივების პარამეტრზე (S11 კოეფიციენტზე), ანტენის თავისუფალ სივრცესთან შეთანხმებაზე, და ასევე დავადგინოთ კორელაცია ტელეფონის ანტენის შეთანხმების პარამეტრსა და ადამიანის ქსოვილების მიერ

შთანთქმულ ემ ველის ენერჯიას (SAR) შორის. მნიშვნელოვანია მოხმარებლის თავში შთანთქმული სიმძლავრის შეფასება ხელის (რომელსაც უჭირავს ტელეფონი) გათვალისწინებით და შედარებითი ანალიზის გაკეთება ხელის გარეშე შემთხვევებისთვის 900, 1900, 3700(მჰც) სიხშირეებზე.

ამისათვის იხსნება ემ ველის დიფრაქციის ამოცანა (მაქსველის განტოლებების გამოყენებით) და ხდება ველის განაწილების დადგენა საკვლევ არეში, ხოლო შემდგომ ველის განაწილების გამოყენებით ხორციელდება იმ შთანთქმული ენერჯიის (SAR-ის) პოვნა, რომელიც გადადის სითბოში. სითბური ამოცანა კი იხსნება ბიოსითბოს გავრცელების განტოლების გამოყენებით. FDTD მეთოდის გამოყენება მოითხოვს საკმაოდ მძლავრ კომპიუტერულ რესურსს და გააჩნია საკმაოდ ხანგრძლივი თვლის დრო, ამიტომ იგი უფრო მეტად მოსახერხებელია მცირე ზომის არაერთგვაროვან გეომეტრიებზე კვლევების ჩასატარებლად. დასმული ამოცანა წარმოადგენს [60] დისერტაციის გაგრძელებას. შემოთავაზებულ ნაშრომში შესწავლილია ემ დასხივების ამოცანა ზრდასრული ადამიანის და ბავშვის თავის მოდელეებში, გამოკვლეულია ემ ველის და SAR-ის პიკური მნიშვნელობების დამოკიდებულება მობილური ტელეფონის ანტენის შეთანხმებაზე თავისუფალ სივრცესთან.

2) ემ გამოსხივების ზეგავლენის შესწავლა ადამიანზე მანქანაში.

წარმოდგენილი კვლევის ამოცანაა დამხმარე გამომსხივებლების მეთოდით (დგმ) ემ ველის დიფრაქციის ამოცანის ამოხსნა ადამიანის ერთგვაროვან მოდელზე (დიფლექტრიკულ ობიექტზე), რომელიც იმყოფება მანქანაში (ნაწილობრივ ღია გამტარი ზედაპირის შიგნით), როცა ემ ველის წყარო მოთავსებულია მანქანის შიგნით ადამიანის თავთან ახლოს (მობილური ტელეფონის მსგავსად) და მანქანის გარეთ (საბაზო სადგურის ანტენა). საძიებელია დიფრაგირებული ველის განაწილება მანქანის შიგნით და გარეთ; ასევე, ველისა და SAR-ის განაწილების დადგენა ადამიანის მოდელისთვის 300, 450, 900 და 1800 [მჰც] სიხშირეებზე; შორი ველის დიაგრამის შეფასება, მანქანის სიხშირული მახასიათებლების აგება, რეზონანსული სიხშირეების

პოვნა და ამ სიხშირეებზე SAR-ის პიკური მნიშვნელობების შეფასება, რაც შეიძლება საფრთხის შემცველი აღმოჩნდეს მანქანაში მყოფი ადამიანისთვის. კვლევაში გათვალისწინებულია დედამიწის, როგორც ამრეკლი ზედაპირის, გავლენა მანქანის შიგნით ველის ფორმირების პროცესში.

§5. სადისერტაციო ნაშრომის მოკლე მიმოხილვა

წარმოდგენილი სადისერტაციო ნაშრომი შედგება შესავალის, სამი თავისა თავისი დასკვნებით და რეკომენდაციებისგან, რომელიც მოყვანილია კვლევის ძირითადი შედეგების სახით. ახლავს გამოყენებული ლიტერატურა.

სადისერტაციო ნაშრომის შესავალში მოცემულია პრობლემის აქტუალობა და მისი თანამედროვე მდგომარეობა, არსებული ლიტერატურის მიმოხილვა, ნაშრომის მიზანი, სიახლე, მნიშვნელობა და ამოცანის დასმა.

პირველ თავში მოყვანილია კვლევაში გამოყენებული მათემატიკური მეთოდები. აღწერილია დროით არეში სასრული სხვაობების მეთოდი ემ და სითბური ამოცანებისათვის; ასევე აღწერილია დამხმარე გამომსხივებლების მეთოდი დიფრაქციის ამოცანების ამოსახსნელად.

მეორე თავში შესწავლილია მობილური ტელეფონის patch (ბრტყელ-ფირფიტოვანი) და დიპოლური ტიპის ანტენით გამოსხივებული ემ ველის ზეგავლენა ზრდასრული ადამიანისა და ბავშვის არაერთგვაროვან მოდელეებზე. გამოკვლევულ იქნა ახლო ველისა და შორი ველის განაწილება. განისაზღვრა ზრდასრული ადამიანის და ბავშვის ქსოვილებში შთანთქმული ველის ენერჯია (SAR) და შეფასებულ იქნა ამ შთანთქმით გამოწვეული ტემპერატურის მატება.

ასევე, მოყვანილია მობილურის დიპოლური ანტენის თავისუფალ სივრცესთან შეთანხმების გამოკვლევა ხელის (თითების) სხვადასხვა პოზიციის და მობილურის (ხელთან ერთად) ადამიანის თავის მოდელიდან დაცილების სხვადასხვა მანძილების

(188, 1088, 2088) შემთხვევებში; გაკეთებულია მიღებული შედეგების შედარებითი ანალიზი ხელით და ხელის გარეშე შემთხვევებისთვის.

მესამე თავში წარმოდგენილია ემ დასხივების ამოცანა იმ შემთხვევაში, როდესაც მანქანაში მოთავსებულია ადამიანის ერთგვაროვანი მოდელი და მის თავთან ახლოს მდებარეობს ემ ველის გამომსხივებელი, მობილური ტელეფონის მსგავსად. ამ თავში შემოტანილია ახალი მიდგომა დედამინის, როგორც ამრეკლი ზედაპირის დასამოდელირებლად. დათვლილია ახლო ველის განაწილება მანქანის შიგნით და გარეთ, ასევე ადამიანის მოდელის შიგნით. ასევე დათვლილია შორი ველის დიაგრამა და შესწავლია მანქანის რეზონანსული თვისებები. ნაპოვნია SAR-ის განაწილება ადამიანის მოდელის თავში განხილულ სიხშირეზე.

განხილულია მობილური კავშირგაბმულობის საბაზო სადგურის მიერ გამოსხივებული ემ ველის დიფრაქციის ამოცანა მანქანაში მოთავსებულ ადამიანზე. დათვლილია ახლო ველის განაწილება მანქანის შიგნით და გარეთ, ასევე ადამიანის მოდელის შიგნით. აგებულია მანქანის სიხშირული მახასიათებლები და შესწავლილია მისი რეზონანსული თვისებები. დათვლილია შორი ველის დიაგრამა და ყველა შემთხვევისთვის ნაპოვნია SAR-ის განაწილება ადამიანის მოდელის თავში.

დისერტაციის **ბოლო ნაწილში** მოყვანილია ძირითადი დასკვნები და ბოგიერთი რეკომენდაცია მობილური ტელეფონის შესაძლო მავნე ზეგავლენისგან თავის დასაცავად, რომელიც დაფუძნებულია ამ ნაშრომში მიღებულ შედეგებზე.

პუბლიკაციები

დისერტაციის მასალებზე გამოქვეყნებულია (ან მიღებულია დასაბეჭდად) 3 სამეცნიერო სტატია: 1 იმპაქტ- ფაქტორის მქონე ჟურნალში, 2 რეფერირებად და რეცენზირებად ჟურნალში და 5 საერთაშორისო კონფერენციის თეზისების სახით.

დისერტაციის თემაზე გამოქვეყნებული პუბლიკაციების და თეზისების საერთო სია:

- [1] V. Jeladze, M. Tsverava, **T. Nozadze**, V. Tabatadze, M. Prishvin, R. Zaridze, "EM Exposure Study on Inhomogeneous Human Model Considering Different Hand Positions", XXI-th International Seminar/Workshop on Direct and Inverse Problems of Electromagnetic and Acoustic Wave Theory (DIPED 2016), Tbilisi, Georgia, September 26-29, 2016, pp. 9-12.
- [2] **T. Nozadze**, R. Zaridze, V. Jeladze, V. Tabatadze, I. Petoev, M. Prishvin, "Human Exposure Study for Some Scenarios", 11-th International Conference on Communications, Electromagnetics and Medical Applications (CEMA'16), Athens, Greece, 13-15 October, 2016, pp. 21-23.
- [3] **T. Nozadze**, V. Jeladze, M. Tsverava, V. Tabatadze, M. Prishvin, R. Zaridze, "EM Exposure Study on an Inhomogeneous Child Model Considering Hand Effect", 2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), Kyiv, Ukraine, May 29 -June 2, 2017, pp. 51-54
- [4] V. Jeladze, **T. Nozadze**, V. Tabatadze, I. Petoev, R. Zaridze, "EM EXPOSURE STUDY OF A HUMAN INSIDE THE CAR" 12th International Conference on Communications, Electromagnetics and Medical Applications (CEMA'17), Sofia, Bulgaria, October 12th-14th, 2017, pp. 25-29 .
- [5] **T. Nozadze**, V. Jeladze, V. Tabatadze, I. Petoev, M. Prishvin, R. Zaridze, "Base Station Antenna's EM Exposure Study on a Homogeneous Human Model Located Inside the Car", XXII-nd International Seminar/Workshop on Direct and Inverse Problems of Electromagnetic and Acoustic Wave Theory DIPED 2017, Dnipro, Ukraine, September 25-28, 2017, pp. 209-213 .
- [6] **T. Nozadze**, R. Zaridze, V. Jeladze, V. Tabatadze, I. Petoev, M. Prishvin, "Human Exposure Study for Some Scenarios", Journal of Applied Electromagnetism (JAE), Athens, Greece, Vol. 19, N#. 1, 2017, pp. 9-16.
- [7] V. Jeladze, **T. Nozadze**, R. Zaridze, M. Prishvin, V. Tabatadze, M. Tsverava, "Mobile Phone EM Exposure Study on Inhomogeneous Human Models Considering Different Hand Positions", Journal of Applied Electromagnetism (JAE), Athens, Greece, 2017, pp. 11-22.
- [8] V. Jeladze, **T. Nozadze**, I. Petoev, V. Tabatadze, M. Prishvin, R. Zaridze, "EM Exposure Study of a Human inside the Car using Method of Auxiliary Sources", Journal of Communications Technology and Electronics, **accepted for publication**.

თავი I. კვლევაში გამოყენებული მათემატიკური მეთოდები

§1.1. შესავალი

წინამდებარე დისერტაციაში დასმული ამოცანათა კლასი ფართოა, ამიტომ მოითხოვს სხვადასხვა მიდგომებისა და რამდენიმე კვლევის მეთოდის გამოყენებას. დიფრაქციის ამოცანის ამოსახსნელად და დროში არასტაციონალური პროცესების შესასწავლად ისეთ არაერთგვაროვან, რთული ფორმის სხეულზე, როგორცაა ადამიანის სხეული, ვიყენებთ დროით არეში სასრული სხვაობების (FDTD) მეთოდს. ეს მეთოდი მოითხოვს საკვლევი არის დისკრეტიზებას და დროის ყოველ მომენტში მიმდინარე პროცესი განიხილება ერთდროულად საკვლევი ბადის ყველა უჯრედში. ამასთან, რაც უფრო დიდი სიზუტით გვინდა ამოცანის ამოხსნა, ბადის დისკრეტიზაციის ზომა მით უფრო მცირდება. ამიტომ FDTD მეთოდის გამოყენებისას შეზღუდულები ვართ განსახილველი არის დიდი ზომებისას, რაც საჭიროებს გამოთვლის საკმაოდ დიდ დროს და მძლავრ კომპიუტერულ რესურსს.

ხოლო ერთგვაროვანი და უბან-უბან ერთგვაროვანი მოცულობითი სხეულების შემთხვევაში დროში ჰარმონიული პროცესების აღსაწერად, უმჯობესია გამოყენებულ იქნას დამხმარე გამომსხივებლების მეთოდი (დგმ). ასევე ეს მეთოდი, FDTD მეთოდისგან განსხვავებით, მოსახერხებელია იმ შემთხვევის შესასწავლად, როდესაც ადამიანი იმყოფება გარემოში (ჩვენს შემთხვევაში მანქანაში), მის ახლოს მდებარეობს ემ გამომსხივებელი და ვიხილავთ დიფრაქციის ამოცანას ასეთ სისტემაზე; დგმ ასევე საშუალებას იძლევა შევაფასოთ გამოთვლის ცდომილება, რაც FDTD მეთოდით შეუძლებელია.

§1.2. დროით არეში სასრული სხვაობების (FDTD) მეთოდი მაქსველის განტოლებისათვის.

დროით არეში სასრული სხვაობების მეთოდი (FDTD) [62] წარმოადგენს მაქსველის განტოლებების დისკრეტიზაციას ცენტრალური სხვაობების მეთოდით. ამოცანა არის (1.2.1) განტოლებების დისკრეტიზაცია კომპიუტერული მოდელირებისათვის.

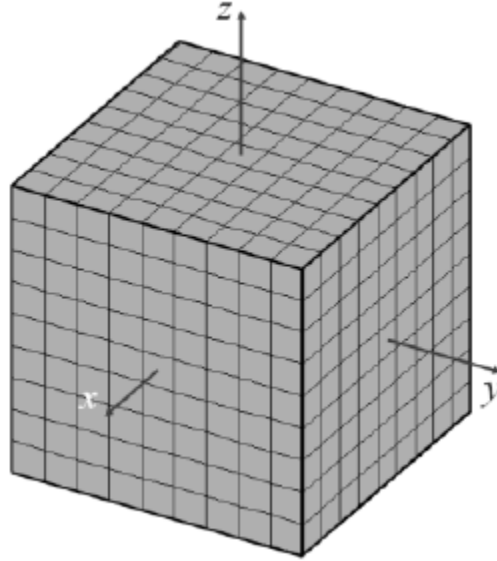
$$\begin{aligned} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} &= -\nabla \times \vec{E} - \vec{M}; \quad \nabla \cdot \vec{D} = 0 \\ \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} &= \nabla \times \vec{H} - \vec{J}; \quad \nabla \cdot \vec{B} = 0 \end{aligned} \tag{1.2.1}$$

სადაც $\vec{D} = \epsilon \vec{E}$ და $\vec{B} = \mu \vec{H}$; ϵ - დიელექტრიკული შეღწევადობაა, μ - მაგნიტური ამთვისებლობა, რომლებიც მოიცემა შემდეგი სახით: $\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$ და $\mu = \mu_r \mu_0$, სადაც ϵ_r და μ_r არის ფარდობითი, ხოლო ϵ_0 და μ_0 თავისუფალი სივრცისთვის ($8,854 \cdot 10^{-12}$ f/m და $4\pi \cdot 10^{-7}$ h/m, შესაბამისად). ხოლო $\vec{J} = \vec{J}_s + \sigma \vec{E}$ და $\vec{M} = \vec{M}_s + \sigma^* \vec{H}$, სადაც \vec{J}_s და \vec{M}_s გარე წყაროებია, ხოლო σ და σ^* ელექტრული გამტარებლობა (სიმ/მ) და მაგნიტური დანაკარგები (ომი/მ). თუ ამ ფორმულებს შევითანთ (1.2.1)-ში და გადავწერთ მათ ინტეგრალური სახით მივიღებთ:

$$\oint_{C'} \vec{E} d\vec{l} = -\frac{\partial}{\partial t} \iint_{S'} \vec{B} d\vec{s} - \iint_{S'} (\vec{M}_s + \sigma^* \vec{H}) d\vec{s} \tag{1.2.2}$$

$$\oint_{C'} \vec{H} d\vec{l} = \frac{\partial}{\partial t} \iint_{S'} \vec{D} d\vec{s} + \iint_{S'} (\vec{J}_s + \sigma \vec{E}) d\vec{s} \tag{1.2.3}$$

ანუ გვაქვს ფარადეის და ამპერის კანონები შესაბამისად. ამ ინტეგრალური განტოლებების დისკრეტიზირება მოცემულ სივრცე-დროის ბადეზე საშუალებას გვაძლევს ამოვხსნათ მაქსველის განტოლებები მოცემული წყაროების და ფიზიკური პარამეტრების შემთხვევაში. IEEE-ს ალგორითმი მდგომარეობს შემდეგში: ვახდენთ (1.2.2-1.2.3) განტოლებების დისკრეტიზირებას სამგანზომილებიან ბადეზე (სურ. 1.2.1).



სურ. 1.2.1 სამგანზომილებიანი ბაღე, საღაც ხღეღა განტოღეღეღის ღისკრეტიზაცია განვსაზღვროთ მთავარი ბაღე $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ ზომის ბიჯის არჩევით. ფუნქცია $f(x, y, z, t)$ გამოსახული ამ ბაღის კიღეღეღში განსაზღვრულია ღისკრეტულ კოორღინატთა სივრცეში როგორც:

$$f(x, y, z, t) = f(i\Delta x, j\Delta y, k\Delta z, n\Delta t) = f_{i,j,k}^n \quad (1.2.4)$$

ასეთი აღნიშვნეღი გვექნეღა ვეღეღის ყვეღა კომპონენტისა ღა ნივთიერეღის პარამეტრეღისთვის. i, j, k - წარმოადგენენ სივრცულ (x, y, z) ინღეღესეღს, n ღროით ინღეღეს, N_x, N_y, N_z კვანღეღის რაოღენობაა სივრცულ ბაღეღე.

$$\begin{aligned} \Delta x_i &= x_{i+1} - x_i; i = 1, N_x - 1; \\ \Delta y_j &= y_{j+1} - y_j; j = 1, N_y - 1; \\ \Delta z_k &= z_{k+1} - z_k; k = 1, N_z - 1; \end{aligned} \quad (1.2.5)$$

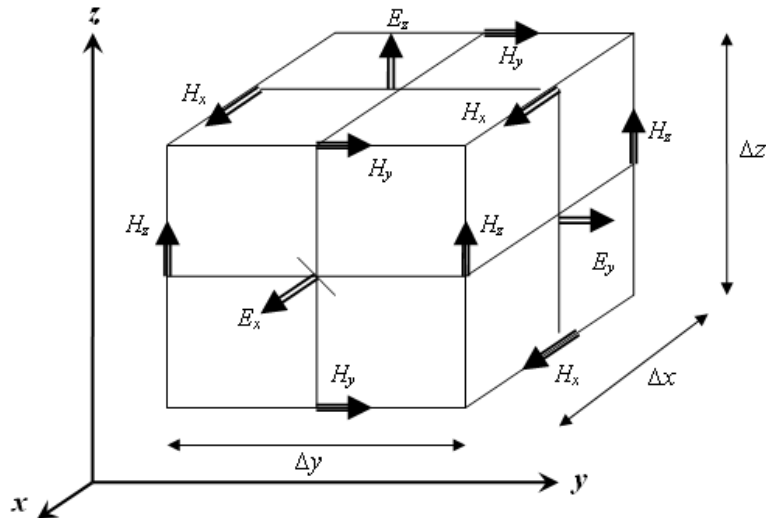
ელემენტარული უჯრეღის ცენტრის კოორღინატეღი იქნეღა:

$$x_{i+1/2} = x_i + \Delta x_i / 2; y_{j+1/2} = y_j + \Delta y_j / 2; z_{k+1/2} = z_k + \Delta z_k / 2; \quad (1.2.6)$$

ხოლო ცენტრეღს შორის მანღიღი:

$$\Delta h_i = (\Delta x_i + \Delta x_{i-1}) / 2; \Delta h_j = (\Delta y_j + \Delta y_{j-1}) / 2; \Delta h_k = (\Delta z_k + \Delta z_{k-1}) / 2; \quad (1.2.7)$$

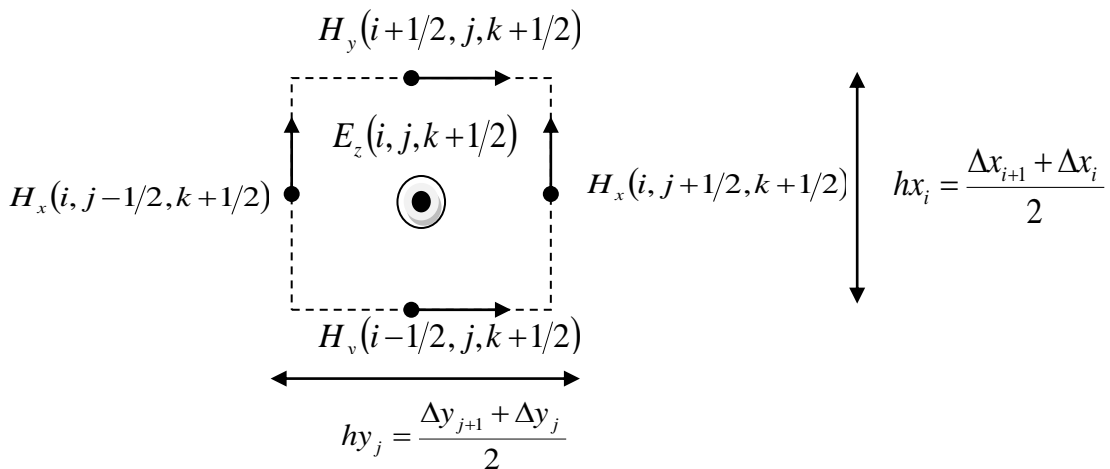
სურ. 1.2.2-ზე მოცემულია \vec{E} და \vec{H} ველების კომპონენტების განაწილება სამგანზომილებიან ბადეზე. ველები ალგორითმის თანახმად ნაწილდება ასე: \vec{E} ველები მოცემულია უჯრედის ნიბოების ცენტრებში, ხოლო \vec{H} ველები კი უჯრედის წახნაგების ცენტრებში.



სურ. 1.2.2 E და H ველები

სურ. 1.2.2-დან Z ღერძის მართობი შუალედური ბადის ამოღებით მივიღებთ ქვემოთ მოცემულ სურათს, სადაც ველის E_z კომპონენტაა მოცემული.

ყოველი “უჯრედისთვის” ველის E_z კომპონენტის განახლება ხდება მისი მეზობელი ველების კომპონენტებით, აღებული დროის $1/2$ ბიჯით უკან და შესაბამისი კომპონენტის საშუალებით წინა ბიჯზე. შემდეგ ვზრდით დროს დროითი ბიჯის ნახევარით და შესაბამისად ხდება \vec{H} ველის კომპონენტების განახლება.



სურ. 2.1.3. E და H ველები

$$\begin{aligned} & \left(H_y \left(i + \frac{1}{2}, j, k + \frac{1}{2} \right) - H_y \left(i - \frac{1}{2}, j, k + \frac{1}{2} \right) \right) \cdot hy_j + \left(H_x \left(i, j - \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2} \right) - H_x \left(i, j + \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2} \right) \right) \cdot hx_i = \\ & \varepsilon_{i,j,k+\frac{1}{2}} \cdot \left[\frac{E_z^{n+1} \left(i, j, k + \frac{1}{2} \right) - E_z^n \left(i, j, k + \frac{1}{2} \right)}{\Delta t} \right] \cdot hx_i \cdot hy_j + \sigma_{i,j,k+\frac{1}{2}} \cdot \left[\frac{E_z^{n+1} \left(i, j, k + \frac{1}{2} \right) + E_z^n \left(i, j, k + \frac{1}{2} \right)}{2} \right] \cdot hx_i \cdot hy_j \end{aligned} \quad (1.2.8)$$

საიდანაც E_z^{n+1} - თვის მივიღებთ:

$$E_z^{n+1} \left(i, j, k + \frac{1}{2} \right) = \left(\frac{2\varepsilon_{i,j,k+\frac{1}{2}} - \sigma_{i,j,k+\frac{1}{2}} \Delta t}{2\varepsilon_{i,j,k+\frac{1}{2}} + \sigma_{i,j,k+\frac{1}{2}} \Delta t} \right) \cdot E_z^n \left(i, j, k + \frac{1}{2} \right) + \left(\frac{2\Delta t}{2\varepsilon_{i,j,k+\frac{1}{2}} + \sigma_{i,j,k+\frac{1}{2}} \Delta t} \right) \cdot \left[\frac{1}{hx_i} \left(H_y \left(i + \frac{1}{2}, j, k + \frac{1}{2} \right) - H_y \left(i - \frac{1}{2}, j, k + \frac{1}{2} \right) \right) + \frac{1}{hy_j} \left(H_x \left(i, j + \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2} \right) - H_x \left(i, j - \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2} \right) \right) \right] \quad (1.2.9)$$

ანალოგიურად გვექნება დანარჩენი კომპონენტებისთვისაც. სხვადასხვა სივრცული ბიჯის გათვალისწინება პროგრამაში ორივე ტიპის, ერთგავროვანი და ადაპტიური ბადის, აგების საშუალებას იძლევა. ასევე ნივთიერებათა პარამეტრები მოცემულია ბადის კვანძებზე და დამოკიდებულია ინდექსებზე i, j, k , რაც არაერთგავროვანი ობიექტების გამოკვლევის საშუალებას იძლევა. დროითი ბიჯი გამოითვლება კურანტის პირობიდან: $\Delta t \leq \frac{\delta}{c\sqrt{3}}$, სადაც δ მინიმალური სივრცითი ბიჯია ბადეზე.

სასრული სხვაობების მეთოდი ერთადერთი რიცხვითი მეთოდია, რომელიც გამოიყენება რთულ ანატომიურ მოდელებზე ე.მ. დასხივების მოდელირებისას. ის გვაძლევს საშუალებას ელექტრომაგნიტური და თერმული ამოცანების მოდელირებისას გამოყენებულ იქნას ერთიდაიგივე დისკრეტული ბადე.

სასრული სხვაობების მეთოდის ერთ-ერთი ნაკლი არის ის, რომ არ არსებობს ამონახსნის სიზუსტის შეფასების მეთოდიკა. იმ ფაქტს, რომ ამოცანა არის სწორედ ამოხსნილი მიუთითებს მხოლოდ კრებადობის არსებობა.

დამატებით უნდა აღინიშნოს, რომ ნივთიერების ელექტრომაგნიტური და თერმული თვისებები არის დამოკიდებული სიხშირეზე და ტემპერატურაზე, რაც მნიშვნელოვნად ართულებს მოდელირების პროცესს.

§ 1.3. სითბური პროცესების რიცხვითი მოდელირება FDTD მეთოდით

სითბური პროცესების რიცხვითი მოდელირება დაფუძნებულია პენეს ბიო-სითბოს (1.3.1) განტოლებაზე. ამ განტოლების მოდელირება (1.3.2) სასაზღვრო პირობით მაქსველის განტოლებების მოდელირების ანალოგიურია.

$$\rho \cdot C \frac{\partial T}{\partial t} = \vec{\nabla} K \vec{\nabla} T + \rho \cdot SAR + A_0 - B \cdot (T - T_b) \quad (1.3.1)$$

$$K \frac{\partial T}{\partial n} = -h(T - T_a) \quad (1.3.2)$$

სადაც SAR შთანთქმის კუთრი სიჩქარეა, A_0 - მეტაბოლური კოეფიციენტი, ხოლო T_b - სისხლის ტემპერატურა.

$$SAR = \frac{\sigma}{2\rho} E^2$$

სითბური განტოლების (1.3.1) მოდელირებისას იგივე სივრცული ბადე გამოიყენება, რაც გვაქვს მაქსველის განტოლებების შემთხვევაში. ვიყენებთ ნივთიერებებს, რომლებიც მოცემულია უჯრედის ცენტრებში. ვწერთ სითბური ბალანსის განტოლებას:

$$\int_{t_n}^{t_{n+1}} dt \iiint_V \rho \cdot C \frac{\partial T}{\partial t} dV = - \int_{t_n}^{t_{n+1}} dt \oiint_S \vec{G} d\vec{s} + \int_{t_n}^{t_{n+1}} dt \iiint_V \rho \cdot SAR * dV + \int_{t_n}^{t_{n+1}} dt \iiint_V A_0 * dV - \int_{t_n}^{t_{n+1}} dt \iiint_V B \cdot (T - T_b) * dV \quad (1.3.3)$$

სადაც V ელემენტარული უჯრედის მოცულობაა, S - ზედაპირი, ხოლო $\vec{G} = -K \vec{\nabla} T$ არის სითბოს ნაკადი მოცემული უჯრედის ზედაპირზე. ნაკადების ენაზე განტოლებების მოდელირება მეტად მოხერხებულია სხვადასხვა სასაზღვრო პირობების მოდელირებისათვის. მაგალითად ვინაიდან (1.3.2) პირობის გათვალისწინება ნიშნავს \vec{G} ნაკადზე პირობის დადებას. ვინაიდან ბადე ორთოგონალურია ეს ნიშნავს რომ უჯრედის წახნაგებზე გვაქვს მხოლოდ ერთი კომპონენტი G_x, G_y, G_z , შესაბამისად x, y, z წახნაგებზე. (1.3.3) დისკრეტიზება საბოლოოდ გვაძლევს:

$$\begin{aligned}
T_{i+1/2, j+1/2, k+1/2}^{n+1} &= T_{i+1/2, j+1/2, k+1/2}^n + (G_{x,i,j,k}^n - G_{x,i+1,j,k}^n) \frac{\Delta t}{C_{i+1/2, j+1/2, k+1/2} \rho_{i+1/2, j+1/2, k+1/2}} \\
&+ (x \rightarrow y \& x \rightarrow z \text{ terms}) \\
&- \frac{\Delta t}{C_{i+1/2, j+1/2, k+1/2} \rho_{i+1/2, j+1/2, k+1/2}} B_{i+1/2, j+1/2, k+1/2} (T_{i+1/2, j+1/2, k+1/2}^n - T_b) \\
&+ \frac{\Delta t}{C_{i+1/2, j+1/2, k+1/2} \rho_{i+1/2, j+1/2, k+1/2}} (\rho_{i+1/2, j+1/2, k+1/2} \cdot SAR_{i+1/2, j+1/2, k+1/2} \\
&+ A_{0_{i+1/2, j+1/2, k+1/2}})
\end{aligned} \tag{1.3.4}$$

სადაც $G_{x,i,j,k}^n = -\frac{k_{i-1,j,k} k_{i,j,k}}{(k_{i,j,k} + k_{i-1,j,k})} \cdot \frac{T_{i+1/2, j+1/2, k+1/2}^n - T_{i-1/2, j+1/2, k+1/2}^n}{\Delta h_{x, i-1}}$ კონვექციური სასაზღვრო

პირობების შემთხვევაში შესაბამისი ნაკადის ფორმულა იცვლება (1.3.1) დისკრეტიზაციით. (1.3.2) ფორმულაში კოეფიციენტების ცვლილებით აღვილად შეიძლება სხვადასხვა სასაზღვრო პირობების (კონვექცია, მუდმივი ტემპერატურა, ადიაბატური სასაზღვრო პირობა) მოდელირება.

პენეს ბიო-სითბოს განტოლებაში (1.3.1) სისხლის ტემპერატურა T_b სივრცით და დროით მუდმივია, მთელ გამოსაკვლევ არეში; ამის გამო აღნიშნული განტოლება არ აღწერს სისხლის მოძრაობას და მისი მიერ სითბოს გადატანის პროცესს. იმისათვის, რომ გათვალისწინებული ყოფილიყო ქსოვილში სისხლის დინებით გამონვეული სითბოს გადატანა, საჭირო გახდა სისხლის მიმოქცევის მოდელირება და ტრადიციული პენეს ბიო-სითბოს განტოლების (1.3.1) მოდიფიცირება.

სისხლის მიმოქცევის მოდელირება იყოფა ორ ამოცანად: შედარებით ფართო სისხლძარღვების აგება და სისხლის დინების ვექტორების აგება განსახილველი არის თითოეული წერტილისათვის [57]. სისხლის მიმოქცევის გათვალისწინება ბიო-სითბოს განტოლებაში, მოდიფიცირებული ბიო-სითბოს განტოლება დეტალურად აღწერილია [57].

§ 1.4. დამხმარე გამომსხივებლების მეთოდი (დგმ)

დამხმარე გამომსხივებლების მეთოდი წარმოადგენს კარგად შემუშავებულ რიცხვით მეთოდს, რომელიც საშუალებას იძლევა წინასწარ არჩეული სიზუსტით ამოიხსნას ელექტრომაგნიტური ტალღის დიფრაქციის ამოცანა რთული ფორმის მქონე სხეულებზე.

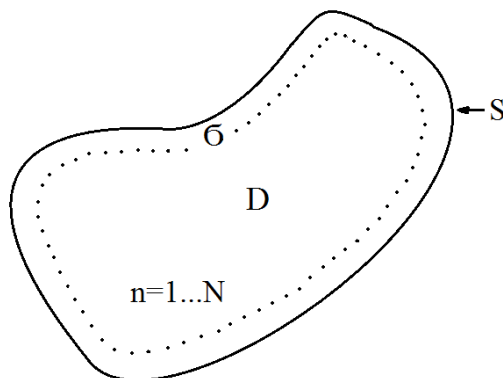
დავუშვათ გვაქვს იდეალურად გამტარი S ზედაპირით შემოსაზღვრული D არე (ნახ. 1.4.1). დროში ჰარმონიული დაცემული ველისთვის (დროზე დამოკიდებულებაში იგულისხმებ $e^{-i\omega t}$ სახის დამოკიდებულება) ამოცანა დაიყვანება ჰელმჰოლცის განტოლების ამოხსნის პოვნაზე:

$$\Delta U^s(\vec{r}) + k^2 U^s(\vec{r}) = 0, \quad (1.4.1)$$

რომელიც აკმაყოფილებს შემდეგ სასაზღვრო პირობას:

$$W\{U^s(\vec{r}) - U^i(\vec{r})\} = 0, \quad M(\vec{r}) \in S \quad (1.4.2)$$

სადაც $U^i(\vec{r})$ და $U^s(\vec{r})$ შესაბამისად დაცემული და გაბნეული ელექტრომაგნიტური ველებია, ხოლო W - სასაზღვრო პირობის ოპერატორი, რომელიც დამოკიდებულია S ზედაპირის თვისებებზე. [63] - შრომის თანახმად, აღნიშნული ზედაპირის მიერ გაბნეული ველის წარმოსადგენად, D არის შიგნით ვათავსებთ დამხმარე ზედაპირს, რომელზეც თანაბრადაა განაწილებული წერტილების სიმრავლე $\{\vec{r}_n\}_{n=1}^{\infty} \in \sigma$ (სურ. 1.4.1).



სურ. 1.4.1 იდეალურად გამბნევე სხეულზე დიფრაქციის ამოცანის გეომეტრია

ვთქვათ, ფუნქციები წარმოადგენენ ჰელმჰოლცის განტოლების ფუნდამენტურ ამოხსნებს, რომელთა საშუალებითაც აღინერება გაბნეული ველი. მათი ფიზიკური აზრია ელემენტარული გამომსხივებლების ველი. ასეთი ფუნქციებია:

ორგანზომილებიან შემთხვევაში:

$$U(\vec{r}_n - \vec{r}) = H_0^{(1)}\left(k\sqrt{(x_n - x)^2 + (y_n - y)^2}\right) \quad (1.4.3)$$

სამგანზომილებიან შემთხვევაში:

$$U(\vec{r}_n - \vec{r}) = \frac{e^{ik|\vec{r}_n - \vec{r}|}}{|\vec{r}_n - \vec{r}|} \quad (1.4.4)$$

სადაც $|\vec{r}_n - \vec{r}| = \sqrt{(x_n - x)^2 + (y_n - y)^2 + (z_n - z)^2}$; $M(x_n, y_n, z_n) \in \sigma$; \vec{r} დაკვირვების წერტილის რადიუს-ვექტორია, $M(\vec{r}) = M(x, y, z)$.

შრომებში [63,64] ვ. კუპრაძემ დაამტკიცა, რომ:

ჰელმჰოლცის განტოლების ფუნდამენტურ ამოხსნების $\{U(\vec{r}_n - \vec{r})\}_{n=1}^{\infty}$ ფუნქციათა სისტემა, რომელიც აღწერს ველის მახასიათებლებს (ელექტრულს, მაგნიტურს ან ველის პოტენციალს) S ზედაპირზე, წარმოადგენს სრულ და წრფივად დამოუკიდებელ სისტემას, L_2 (S ზედაპირზე განსაზღვრულ კვადრატით ინტეგრირებად ფუნქციათა სივრცეში) ფუნქციათა სივრცეში; რაც ნიშნავს, რომ S ზედაპირზე განსაზღვრულ ნებისმიერი კვადრატით ინტეგრირებადი $U^i(x, y, z)$ ფუნქციისათვის და ნებისმიერი $\varepsilon > 0$ რიცხვისთვის არსებობს ისეთი N და j_n კოეფიციენტები, რომ:

$$\int_s \left[\sum_{n=1}^N j_n U(\vec{r}_n - \vec{r}) - U^i(x, y, z) \right]^2 ds < \varepsilon(N)$$

ანუ, აღნიშნული სისტემის სასრული რაოდენობის ფუნქციას S ზედაპირზე შეუძლია აღწეროს გაბნეული ველის მახასიათებელი ყველა შესაძლო ფუნქცია წინასწარ მოცემული სიზუსტით. ამოხსნა კი გამოისახება ფუნდამენტური ამონახსნების წრფივი კომბინაციით შესაბამისი კოეფიციენტების გათვალისწინებით:

$$\int_s \left| W \left[\sum_{n=1}^N j_n U(\vec{r}_n - \vec{r}) - U^i(x, y, z) \right] \right|^2 ds < \varepsilon(N)$$

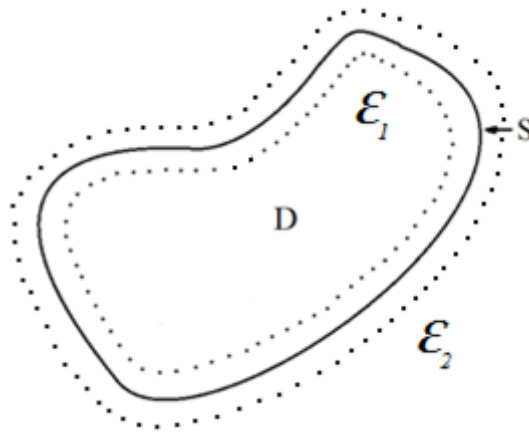
სადაც $\varepsilon(N)$ მოცემული სიზუსტეა, რომელიც ზოგადად დამოკიდებულია წერტილთა რაოდენობაზე, ანუ ამ სიზუსტით:

$$U^i(x, y, z)|_S \approx \sum_{n=1}^N j_n U_n(|\vec{r}_n - \vec{r}|) \Big|_S \quad (1.4.5)$$

მაშინ დასმული სასაზღვრო ამოცანის მიახლოებითი ამოხსნა:

$$\tilde{U}^s(x, y, z) = \sum_{n=1}^N j_n U(|\vec{r}_n - \vec{r}|) \quad (1.4.6)$$

D არის გარეთ მიისწრაფვის ნამდვილი $U^s(x, y, z)$ ამოხსნისაკენ, როცა $N \rightarrow \infty$. სწორედ ამაში მდგომარეობს ვ. კუპრადის მიერ შემოთავაზებული დამხმარე გამომსხივებლების მეთოდის შინაარსი.



სურ. 1.4.2 დიელექტრიკულ სხეულზე დიფრაქციის ამოცანის გეომეტრია

დიელექტრიკული გამბნევის შემთხვევაში, როცა სხეულის გარეთ გაბნეულ ველთან ერთად საჭიროა სხეულის შიგნით არსებული ველის განსაზღვრაც, აუცილებელია ავირჩიოთ ორი დამხმარე ზედაპირი, გამბნევი სხეულის შიგნით და გარეთ (სურ. 1.4.2). დამხმარე გამომსხივებლები, რომლებიც მოთავსებულნი არიან სხეულის შიგნით არსებულ დამხმარე ზედაპირზე, ისევე როგორც იდეალურად გამტარი სხეულის შემთხვევაში, განსაზღვრავენ ველს სხეულის გარეთ, ხოლო გარეთ მოთავსებული გამომსხივებლები განსაზღვრავენ ველს დიელექტრიკის შიგნით. თითოეულ ამ ზედაპირებზე მოთავსებულია N რაოდენობის დამხმარე გამომსხივებელი, რომელთა ვექტორ პოტენციალები წარმოდგენილია ჰელმჰოლცის განტოლების ფუნდამენტური ამოხსნებით: $U(k\sqrt{\epsilon\mu}|\vec{r}_n - \vec{r}|)$, სადაც ϵ და μ შესაბამისად სხეულის დიელექტრიკული და მაგნიტური შეღწევადობაა, \vec{r}_n იმ წერტილის რადიუს ვექტორია, სადაც მოთავსებულია დამხმარე გამომსხივებელი, ხოლო \vec{r} დაკვირვების წერტილის რადიუს ვექტორია.

უცნობი ელექტრული და მაგნიტური ველები ამ დამხმარე გამომსხივებლების საშუალებით გამოისახება როგორც ჯამი უცნობი კოეფიციენტებით:

$$E(\vec{r}) = \hat{w}_e \left\{ \sum_{n=1}^N a_n U(k\sqrt{\varepsilon\mu}|\vec{r}_n - \vec{r}|) \right\} \quad (1.4.7)$$

$$H(\vec{r}) = \hat{w}_h \left\{ \sum_{n=1}^N a_n U(k\sqrt{\varepsilon\mu}|\vec{r}_n - \vec{r}|) \right\} \quad (1.4.8)$$

სადაც \hat{w}_e და \hat{w}_h ვექტორ-პოტენციალის მნიშვნელობების შესაბამისი უცნობი ელექტრული და მაგნიტური ველების გამოსათვლელი ოპერატორებია.

თუ გამხმარე სხეულს ეცემა $U^{inc}(\vec{r})$ ტალღა, სასაზღვრო პირობები შეიძლება ჩაიწეროს შემდეგნაირად:

$$\begin{cases} \hat{W}_e \left[\sum_{n=1}^{\infty} a_n^{out} U(k\sqrt{\varepsilon_1\mu_1}|\vec{r}_n - \vec{r}|) - \sum_{n=1}^{\infty} a_n^{in} U(k\sqrt{\varepsilon_2\mu_2}|\vec{r}_n - \vec{r}|) \right] \Big|_S = E_{\tau}^{inc}(\vec{r}) \Big|_S \\ \hat{W}_h \left[\sum_{n=1}^{\infty} a_n^{out} U(k\sqrt{\varepsilon_1\mu_1}|\vec{r}_n - \vec{r}|) - \sum_{n=1}^{\infty} a_n^{in} U(k\sqrt{\varepsilon_2\mu_2}|\vec{r}_n - \vec{r}|) \right] \Big|_S = H_{\tau}^{inc}(\vec{r}) \Big|_S \end{cases} \quad (1.4.9)$$

სადაც \hat{W}_e და \hat{W}_h სასაზღვრო პირობის ოპერატორებია, a_n^{in} და a_n^{out} შესაბამისად დიელექტრიკის შიგნით და გარეთ განლაგებული დამხმარე გამომსხივებლების კოეფიციენტებია, ხოლო $E_{\tau}^{inc}(\vec{r})$ და $H_{\tau}^{inc}(\vec{r})$ დაცემული ველის ტანგენციალური მდგენელებია S ზედაპირზე. თუ S ზედაპირზე არჩეულია N კოლოკაციის წერტილი, რომელშიც მოითხოვება სასაზღვრო პირობის შესრულება, მაშინ (1.4.9) წარმოადგენს უცნობი კოეფიციენტების მიმართ წრფივ განტოლებათა სისტემას. ამ სისტემის ამოხსნით განისაზღვრება a_n^{in} და a_n^{out} კოეფიციენტები, და უცნობი გაბნეული ველი შეიძლება გამოითვალოს (1.4.7) და (1.4.8) ფორმულების საშუალებით. ისევე როგორც წინა შემთხვევაში, დამხმარე გამომსხივებლების მეთოდში (1.4.7) და (1.4.8) მიახლოებითი ამოხსნა მისწრაფვის ჭეშმარიტისკენ დამხმარე გამომსხივებლების და შესაბამისად კოლოკაციის წერტილების რაოდენობის გაზრდით.

ველის წარმოსადგენად ფუნქციის არჩევის შემდეგ საჭიროა ავირჩიოთ გაშლის კოეფიციენტების განსაზღვრის ოპტიმალური მეთოდი. ამ მიზნით გამოკვლეული იყო სხვადასხვა მეთოდი: ორთოგონალიზაციის მეთოდი, უმცირესი კვადრატების მეთოდი,

კოლოკაციის მეთოდი და სხვა. გამოკვლევებმა უჩვენეს, რომ გაშლის კოეფიციენტების განსაზღვრისათვის ყველაზე ოპტიმალურია კოლოკაციის მეთოდი, რომლის თანახმადაც სასაზღვრო პირობის შესრულება მოითხოვება გამბნევი სხეულის ზედაპირზე სასრული რაოდენობის კოლოკაციის წერტილებში.

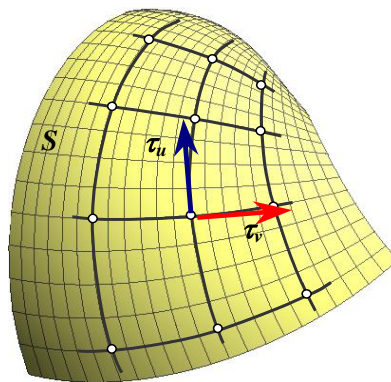
სხვა მეთოდებისგან განსხვავებით კოლოკაციის მეთოდი საშუალებას გვაძლევს: დავიყვანოთ ამოცანის ამოხსნა წრფივ ალგებრულ განტოლებათა სისტემის ამოხსნაზე, რომელიც მოითხოვს მინიმალურ გამოთვლის დროს; თუმცა არ შეგვიძლია ამოვხსნათ დიფრაქციის ამოცანები ნებისმიერად რთული ფორმის ზედაპირზე. განსახილველი ზედაპირი უნდა იყოს გლუვი, არ უნდა გააჩნდეს კიდეები, რათა შეგვეძლოს დამხმარე ზედაპირის წანაცვლება მის შინგით და გაბნეული ველის ანალიზური გაგრძელება.

დიფრაქციის სამგანზომილებიან ამოცანებში დგმ ალგორითმის გამოყენებისას დამხმარე გამომხივებლების ვექტორ-პოტენციალებად ვირჩევთ ელემენტარული ელექტული დიპოლის ელექტრომაგნიტური ველის ფუნქციებს, რომლებიც წარმოადგენენ ჰელმჰოლცის განტოლების ფუნდამენტურ ამონახსნს [65]:

$$\vec{E}(\vec{R}_n) = \frac{1}{4\pi\epsilon} e^{-i\omega t} \left\{ \frac{1}{R_n^3} (3\vec{R}_n^0(\vec{R}_n^0, \vec{p}) - \vec{p}) - \frac{ik}{R_n^2} (3\vec{R}_n^0(\vec{R}_n^0, \vec{p}) - \vec{p}) - \frac{k^2}{R_n} [\vec{R}_n^0[\vec{R}_n^0, \vec{p}]] \right\}$$

$$\vec{H}(\vec{R}_n) = -\frac{i\omega}{4\pi} e^{-i\omega t} \left(\frac{1}{R_n^2} - \frac{ik}{R_n} \right) [\vec{p}, \vec{R}_n^0], \quad \vec{R}_n^0 = \text{grad}(R_n),$$

სადაც \vec{p} ელემენტარული ელექტრული დიპოლის დიპოლური მომენტია, \vec{R}_n დიპოლიდან დაკვირვების წერტილამდე რადიუს-ვექტორია.



სურ. 1.4.3 კოლოკაციის წერტილები და ზედაპირის ტანგენციალური ვექტორები

გამბნევი სხეულის ზედაპირზე დაცემული ტალღის შედეგად ინდუცირებული დენების განსასაზღვრად საზოგადოდ სასაზღვრო პირობები იწერება კოლოკაციის N რაოდენობის წერტილში. თვითოეულ წერტილში პირობები ჩაინერება ზედაპირის ორი $\vec{\tau}_u$ და $\vec{\tau}_v$ ტანგენციალური მიმართულებით, რომლებიც ამ წერტილებში ქმნიან ბაზისურ წყვილებს (სურ. 1.4.3). დამხმარე ზედაპირებზე, კოლოკაციის წერტილების გასწვრივ მოთავსებული $\vec{\tau}_u$ და $\vec{\tau}_v$ ვექტორების პარალელური ელემენტარული ელექტრული დიპოლები შესაბამისად აღწერენ ზედაპირზე ინდუცირებული დენის $\vec{\tau}_u$ და $\vec{\tau}_v$ მდგენელებს.

ამრიგად, თუ გამბნევი სხეულის ზედაპირი წარმოადგენს იდეალურად გამტარ ზედაპირს, დგმ ალგორითმის თანახმად ზედაპირის შიგნით ვათავსებთ დამხმარე ზედაპირს, რომელზეც კოლოკაციის \vec{r}_i ($i=1\dots N$) წერტილების გასწვრივ მოთავსებულია \vec{p}_u^i და \vec{p}_v^i დიპოლური მომენტის მქონე ელემენტარული ელექტრული დიპოლების წყვილები. სასაზღვრო პირობა ზედაპირის კოლოკაციის წერტილებში მოითხოვება ელექტრული ველის $\vec{\tau}_u$ და $\vec{\tau}_v$ ტანგენციალური მდგენელებისათვის.

$$\begin{cases} \vec{E}^{out}(\vec{p}_u^j, \vec{r}_i) \cdot \vec{\tau}_u^i + \vec{E}^{out}(\vec{p}_v^j, \vec{r}_i) \cdot \vec{\tau}_u^i = -\vec{E}^{inc}(\vec{r}_i) \cdot \vec{\tau}_u^i \\ \vec{E}^{out}(\vec{p}_u^j, \vec{r}_i) \cdot \vec{\tau}_v^i + \vec{E}^{out}(\vec{p}_v^j, \vec{r}_i) \cdot \vec{\tau}_v^i = -\vec{E}^{inc}(\vec{r}_i) \cdot \vec{\tau}_v^i \end{cases}, \quad j, i = 1 \dots N, \quad (1.4.10)$$

სადაც $\vec{E}^{out}(\vec{p}_u^j, \vec{r}_i)$ და $\vec{E}^{out}(\vec{p}_v^j, \vec{r}_i)$ შესაბამისად \vec{p}_u^i და \vec{p}_v^i დამხმარე გამომსხივებლების მიერ \vec{r}_i კოლოკაციის წერტილში შექმნილი ელექტრული ველის მნიშვნელობებია, ხოლო $\vec{E}^{inc}(\vec{r}_i)$ დაცემული ელექტრული ველის მნიშვნელობაა \vec{r}_i წერტილში. (1.4.10) წარმოადგენს $2N \times 2N$ განზომილებიან წრფივ ალგებრულ განტოლებათა სისტემას დამხმარე გამომსხივებლების უცნობი კომპლექსური ამპლიტუდების მიმართ.

თუ გამბნევი სხეულის ზედაპირი წარმოადგენს დიელექტრიკული გარემოების გამყოფ საზღვარს, დგმ ალგორითმის თანახმად ზედაპირის შიგნით და გარეთ ვათავსებთ დამხმარე ზედაპირებს. სასაზღვრო პირობა ზედაპირის კოლოკაციის წერტილებში მოითხოვება ელექტრული და მაგნიტური ველის $\vec{\tau}_u$ და $\vec{\tau}_v$ ტანგენციალური მდგენელებისათვის:

$$\begin{cases}
\vec{E}^{in}(\vec{p}_{u_{out}}^j, \vec{r}_i) \cdot \vec{\tau}_u^i + \vec{E}^{in}(\vec{p}_{v_{out}}^j, \vec{r}_i) \cdot \vec{\tau}_v^i - \vec{E}^{out}(\vec{p}_{u_m}^j, \vec{r}_i) \cdot \vec{\tau}_u^i - \vec{E}^{out}(\vec{p}_{v_m}^j, \vec{r}_i) \cdot \vec{\tau}_v^i = \vec{E}^{inc}(\vec{r}_i) \cdot \vec{\tau}_u^i \\
\vec{E}^{in}(\vec{p}_{u_{out}}^j, \vec{r}_i) \cdot \vec{\tau}_v^i + \vec{E}^{in}(\vec{p}_{v_{out}}^j, \vec{r}_i) \cdot \vec{\tau}_u^i - \vec{E}^{out}(\vec{p}_{u_m}^j, \vec{r}_i) \cdot \vec{\tau}_v^i - \vec{E}^{out}(\vec{p}_{v_m}^j, \vec{r}_i) \cdot \vec{\tau}_u^i = \vec{E}^{inc}(\vec{r}_i) \cdot \vec{\tau}_v^i \\
\vec{H}^{in}(\vec{p}_{u_{out}}^j, \vec{r}_i) \cdot \vec{\tau}_v^i + \vec{H}^{in}(\vec{p}_{v_{out}}^j, \vec{r}_i) \cdot \vec{\tau}_u^i - \vec{H}^{out}(\vec{p}_{u_m}^j, \vec{r}_i) \cdot \vec{\tau}_v^i - \vec{H}^{out}(\vec{p}_{v_m}^j, \vec{r}_i) \cdot \vec{\tau}_u^i = \vec{H}^{inc}(\vec{r}_i) \cdot \vec{\tau}_v^i \\
\vec{H}^{in}(\vec{p}_{u_{out}}^j, \vec{r}_i) \cdot \vec{\tau}_u^i + \vec{H}^{in}(\vec{p}_{v_{out}}^j, \vec{r}_i) \cdot \vec{\tau}_v^i - \vec{H}^{out}(\vec{p}_{u_m}^j, \vec{r}_i) \cdot \vec{\tau}_u^i - \vec{H}^{out}(\vec{p}_{v_m}^j, \vec{r}_i) \cdot \vec{\tau}_v^i = \vec{H}^{inc}(\vec{r}_i) \cdot \vec{\tau}_u^i
\end{cases} \quad (1.4.11)$$

$j, i = 1 \dots N,$

სადაც $\vec{E}^{in}(\vec{p}_{u_{out}}^j, \vec{r}_i)$, $\vec{H}^{in}(\vec{p}_{u_{out}}^j, \vec{r}_i)$ და $\vec{E}^{in}(\vec{p}_{v_{out}}^j, \vec{r}_i)$, $\vec{H}^{in}(\vec{p}_{v_{out}}^j, \vec{r}_i)$ არის გარე დამხმარე ზედაპირზე მოთავსებული გამომსხივებლების მიერ შექმნილი ელექტრული და მაგნიტური ველი სხეულის შიგნით, ხოლო $\vec{E}^{out}(\vec{p}_{u_m}^j, \vec{r}_i)$, $\vec{H}^{out}(\vec{p}_{u_m}^j, \vec{r}_i)$ და $\vec{E}^{out}(\vec{p}_{v_m}^j, \vec{r}_i)$, $\vec{H}^{out}(\vec{p}_{v_m}^j, \vec{r}_i)$ შიდა დამხმარე ზედაპირზე მოთავსებული გამომსხივებლების მიერ შექმნილი ელექტრული და მაგნიტური ველი სხეულის გარეთ. (1.4.11) დიფერენციალური სხეულის შემთხვევაში წარმოადგენს $4N \times 4N$ განზომილებიან წრფივ ალგებრულ განტოლებათა სისტემას დამხმარე გამომსხივებლების უცნობი კომპლექსური ამპლიტუდების მიმართ.

ამრიგად, ამოცანა დაიყვანება (1.4.10) ან (1.4.11) წრფივ ალგებრულ განტოლებათა სისტემის ამოხსნაზე. შესაბამისად, დიფერენციალური ველი სივრცის მოცემულ არეში განისაზღვრება ამ არის გარეთ მოთავსებული დამხმარე წყაროებით.

§1.5. I თავის დასკვნა

მიუხედავად იმისა, რომ FDTD მეთოდის გამოყენებით შეგვიძლია საკმაოდ კარგი შედეგების მიღება, დიდი სცენარების შემთხვევაში ასეთი მიდგომა ერთ-ერთი რთული ამოცანაა, რადგან მოითხოვს მძლავრ გამოთვლით რესურსებს. უპირატესობა დგმ-ისა სხვა ღროითი არის მეთოდებთან შედარებით ისაა, რომ დიდი სცენარის ამოცანები (მაგ: ემ ზეგავლენის შესწავლა მანქანაში მყოფ ადამიანზე) შეიძლება შესწავლილ იქნას ჩვეულებრივი კომპიუტერის გამოყენებით. იგი წარმოადგენს მძლავრ მათემატიკურ იარაღს მიმდინარე ემ პრობლემების ამოსახსნელად. დიდი სცენარებისათვის გამოთვლების ჩასატარებლად დამხმარე გამომსხივებლების მეთოდი ბევრად უკეთესია, ვიდრე ღროით არეში სასრულ სხვაობათა მეთოდი.

ერთგვაროვანი და უბან-უბან ერთგვაროვანი გლუვი მოცულობითი სხეულების შემთხვევაში დამყარებული ჰარმონიული პროცესებისათვის, ასევე დიდი სცენარების განხილვისას მიზანშეწონილია დგმ-ის გამოყენება, რადგან თავისუფალი სივრცე არ საჭიროებს დისკრეტიზაციას. იგი ასევე საშუალებას გვაძლევს შევაფასოთ გამოთვლის ცდომილება სასაზღვრო პირობების შესრულების სიზუსტით.

თავი II. FDTD მეთოდით მობილური ტელეფონით გამოსხივებული ემ ველის ზეგავლენის შესწავლა ადამიანის არაერთგვაროვან მოდელზე ხელის სხვადასხვა პოზიციის გათვალისწინებით და ანტენის თავისუფალ სივრცესთან შეთანხმების გამოკვლევა

შესავალი

დისერტაციის ამ ნაწილის მიზანია მობილური ტელეფონის ანტენის მიერ გამოსხივებული ემ ველის ზეგავლენით გამონვეული სითბური ეფექტების ღრმად შესწავლა. კვლევის სიახლეს წარმოადგენს მობილურის ანტენის თავისუფალ სივრცესთან შეთანხმების გამოკვლევა ადამიანის არაერთგვაროვან მოდელზე ხელის (თითების) სხვადასხვა პოზიციის და მობილურის (ხელთან ერთად) ადამიანის თავის მოდელიდან დაცილების სხვადასხვა მანძილების (1მმ, 10მმ, 20მმ) შემთხვევაში; როგორც უკვე აღინიშნა, მნიშვნელოვანია მოხმარებლის თავში შთანთქმული სიმძლავრის შეფასება ხელის (რომელსაც უჭირავს ტელეფონი) გათვალისწინებით და შედარებითი ანალიზის გაკეთება ხელის გარეშე შემთხვევებისთვის. რადგან ხელი, რომელსაც უჭირავს ტელეფონი შთანთქმავს ტელეფონის ანტენის მიერ გამოსხივებული ენერჯიის ნაწილს. მნიშვნელოვანია ასევე SAR დამოკიდებულების შესწავლა მობილური ანტენის შეთანხმების პირობებზე. რეკომენდაციების შემუშავება მობილური ტელეფონის სწორად გამოყენებისთვის, ადამიანის თავის მახლობლად რეაქტიული ველის შესამცირებლად; რათა მინიმუმამდე იყოს დაყვანილი თავში SAR მნიშვნელობები.

§ 2.1. არაერთგვაროვანი მოდელის მომზადება

რიცხვითი ექსპერიმენტები ჩატარდა გამოყენებითი ელექტროდინამიკის ლაბორატორიაში სპეციალურად ამ მიზნით შექმნილი პროგრამული პაკეტის FDTDLab-ის საშუალებით [59,12], [66]. FDTDLab პროგრამა ეფუძნება დროით არეში სასრული სხვაობების მეთოდს (FDTD), რომელიც წარმოადგენს მაქსველის განტოლებების დისკრეტიზაციას სხვაობების მეთოდით. გამოთვლის არედი ადრეულია

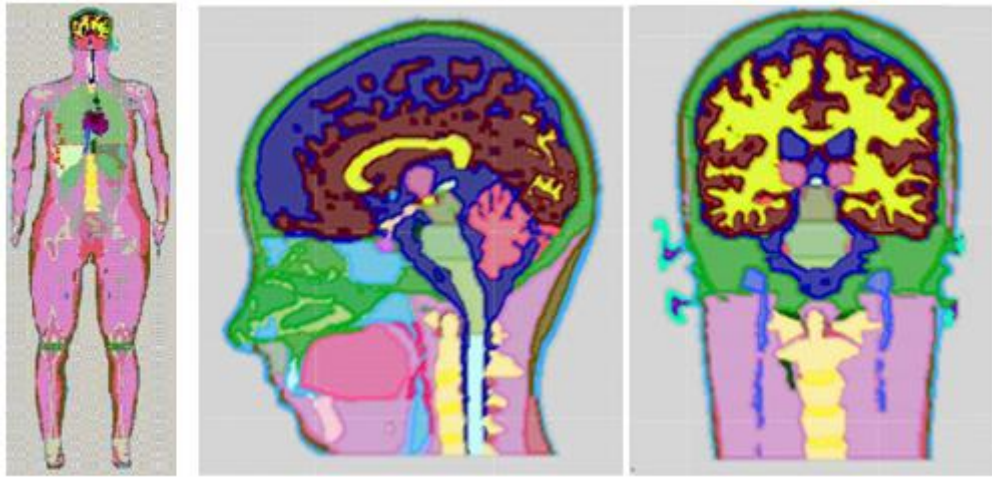
დისკრეტული ბადე, რომლის ყოველი უჯრედი 1 მმ-ია. რიცხვითი გამოთვლებისათვის გამოყენებულ იქნა 1მმ დისკრეტიზაციის ზრდასრული ადამიანისა (ქალის მოდელი-“Ella”) და ბავშვის („Thelonious“) სამგანზომილებიანი არაერთგვაროვანი დისკრეტული მოდელები „Virtual Population“ [67] -დან (სურ.2.1.1.).



სურ.2.1.1. ქალის „Ella“ და ბავშვის “Thelonious” სამგანზომილებიანი მოდელები.

ადამიანის მოდელები [სახელი]	სქესი	წლოვანება [წელი]	სიმაღლე [მ]	წონა [კგ]	BMI [კგ/მ ²]	ქსოვილების რაოდენობა
<u>Ella</u>	მდედრ.	26	1.63	58.7	22.0	76
<u>Thelonious</u>	მამრ.	6	1.17	19.3	14.0	75

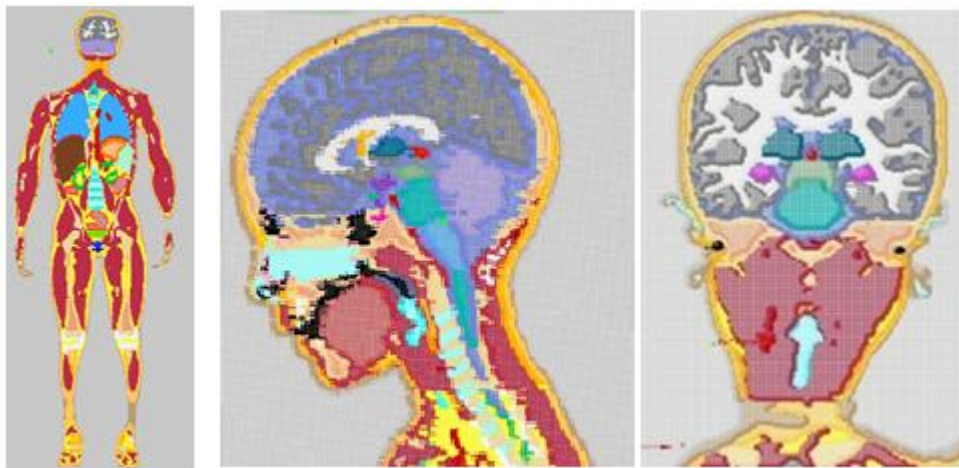
ცხრილი 2.1.1. ქალის „Ella“ და ბავშვის “Thelonious” მოდელების ფიზიკური მონაცემები



ა)

ბ)

სურ.2.1.2. ქალის (Ella) დისკრეტული ა) სრული მოდელი, ბ) თავის არე სხვადასხვა სიბრტყეში.



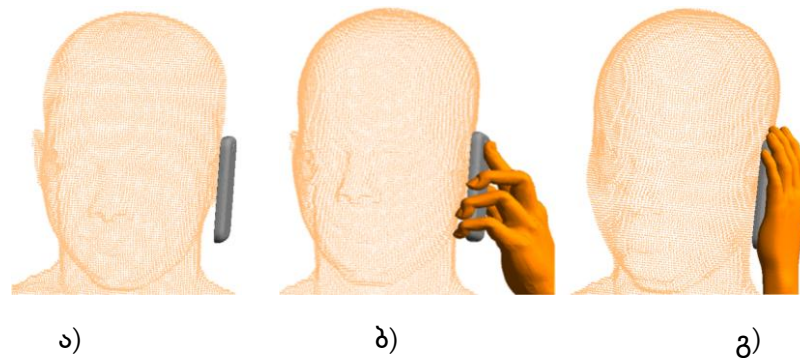
ა)

ბ)

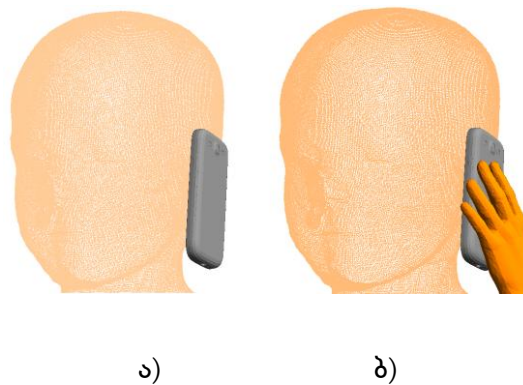
სურ.2.1.3. ბავშვის (Thelonious) დისკრეტული ა) სრული მოდელი, ბ) თავის არე სხვადასხვა სიბრტყეში.

ამ მოდელების (სურ.2.1.2-3) ფაილები cells გაფართოებით იხსნება, გამოყენებითი ელექტროდინამიკისა და რადიოტექნიკის ლაბორატორიაში (თსუ) ადამიანზე ემ ზეგავლენის კვლევისათვის შექმნილი FDTDLab პროგრამული პაკეტის დამხმარე პროგრამის MyFDTD-ის მეშვეობით, სადაც შესაძლებელია მათი დამუშავება, საკვლევი სეგმენტის (მაგ: თავის არე) ამოჭრა, სხვადასხვა ტიპის ანტენის დაყენება და სხვა. გრაფიკულ პროგრამა 3D MAX-ში მომზადდა მობილური ტელეფონისა და ხელის სხვადასხვა პოზიციის მოდელები.

ზრდასრული ადამიანის (ქალის) მოდელისთვის მომზადდა ხელის ორი პოზიცია: როცა მობილური ტელეფონი დაჭერილია მხოლოდ თითების მეშვეობით (**hand 1**) და როცა მობილური ტელეფონი დაჭერილია მთლიანი ხელის მტევანით, ეხება ხელის გულს (**hand 2**). ბავშვის მოდელისთვის კი მომზადდა ხელის ერთი პოზიცია (რადგან ბავშვის ხელი დაახლოებით მობილური ტელეფონის ზომისაა). მობილური ტელეფონი და ხელი მოთავსებული იყო თავის მოდელიდან 1მმ, 10მმ და 20მმ მანძილებზე. შესწავლილი მოდელები წარმოდგენილია სურ.2.1.4 და სურ.2.1.5-ზე.



სურ.2.1.4. ზრდასრული ადამიანის (Ella) თავის მოდელის, მობილური ტელეფონის და ხელის 3D გეომეტრიები: ა) ხელის გარეშე, ბ) **hand 1**, გ) **hand 2**.

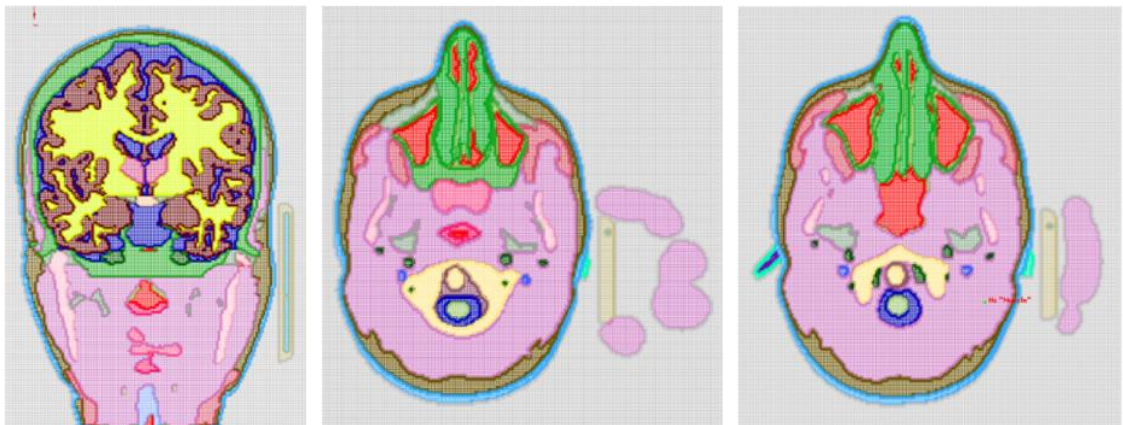


სურ.2.1.5. ბავშვის (Thelonious) თავის მოდელის და მობილური ტელეფონის 3D გეომეტრიები: ა) ხელის გარეშე, ბ) ხელის გათვალისწინებით.

განხილული მოდელები შეიცავენ დიელექტრიკული თვისებების მქონე 80 სხვადასხვა სახის ქსოვილს. სიმარტივისათვის, ხელი განხილულია როგორც კუნთოვანი ქსოვილი (ფანტომი). სიხშირეზე დამოკიდებული ქსოვილის პარამეტრები დიფრაქციის ემ ამოცანის ამოსახსნელად აღებულ იქნა [51]-დან, ხოლო ქსოვილის თერმული პარამეტრები სითბური ამოცანის ამოსხნისათვის გამოყენებულ იქნა [52]-

დან. მოდელირებისათვის 900, 1900, 3700 [მჰც] სიხშირეების სინუსოდალური ფორმის ტალღა შეირჩა.

მობილური ტელეფონის ზომებია (L × W × H) 5 × 0.8 × 9 [სმ], რომელშიც ჩაშენებულია დიპოლური (ან Patch-ბრტყელ-ფირფიტოვანი) ანტენა. მობილური ტელეფონის კეისის $\epsilon=2$ (დიელექტრიკული შეღწევადობა). ადამიანის თავის დისკრეტული მოდელები, ხელის პოზიციები და მობილური ტელეფონი სხვადასხვა კვეთაში ნაჩვენებია სურ 2.1.6 და სურ 2.1.7.

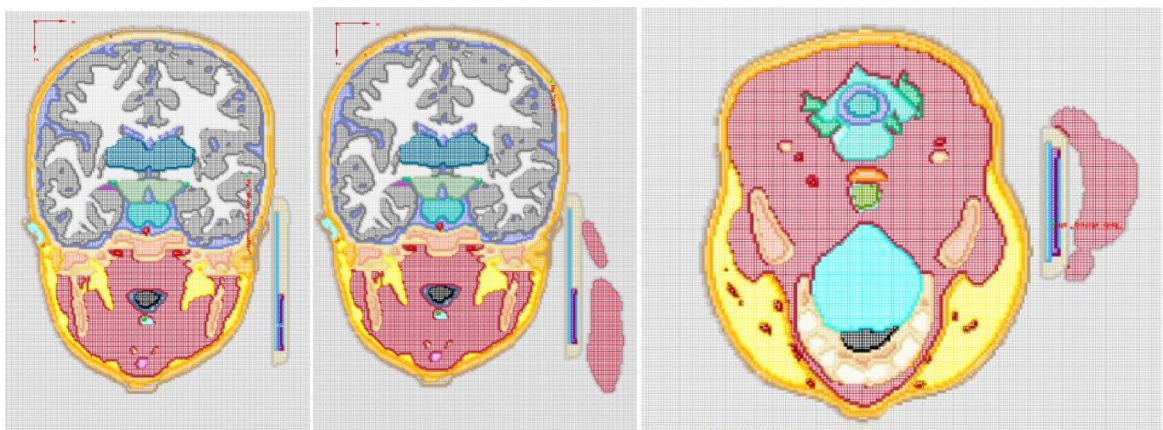


ა)

ბ)

გ)

სურ 2.1.6. დისკრეტული ზრდასრული ადამიანის თავის მოდელი მასთან დაყენებული მობილური ტელეფონით სხვადასხვა სიბრტყეში: ა) ხელის გარეშე, ბ) Hand 1, გ) Hand 2.



ა)

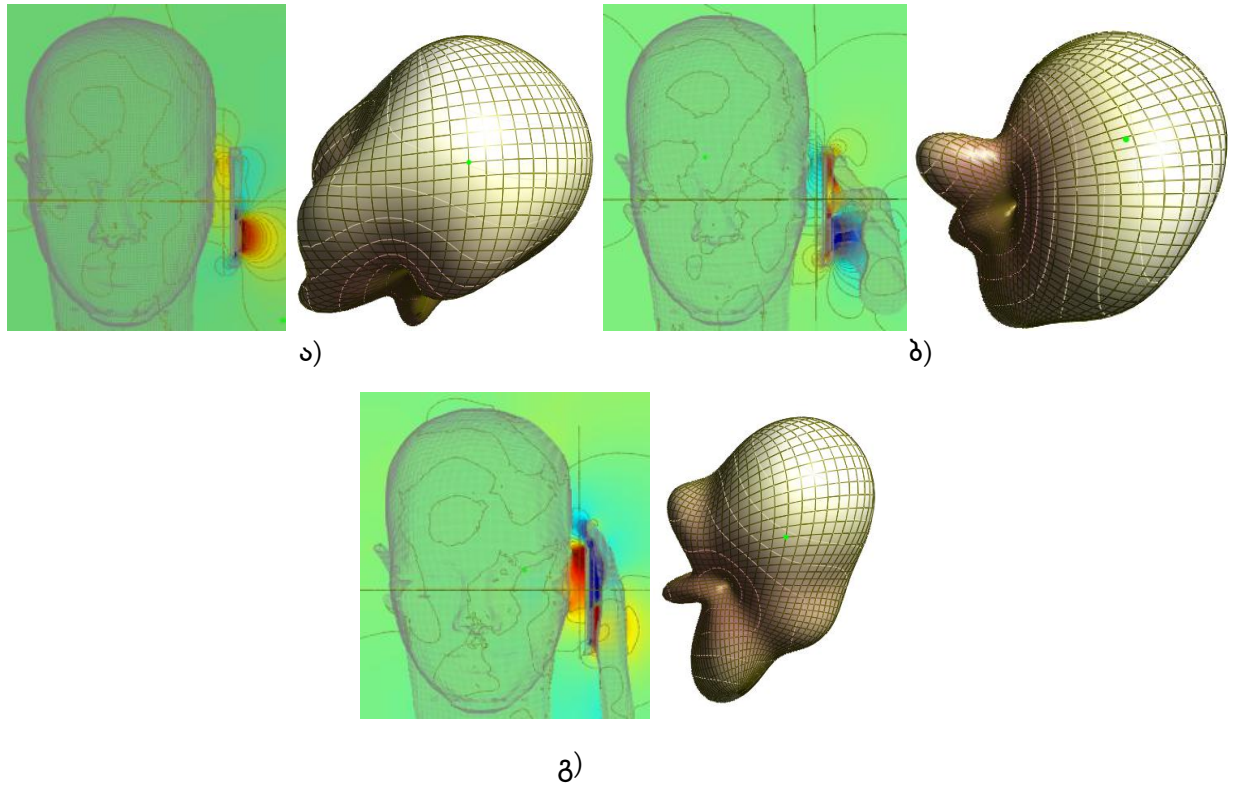
ბ)

სურ 2.1.7. დისკრეტული ბავშვის (Thelonious) თავის მოდელი მასთან დაყენებული მობილური ტელეფონით: ა) ხელის გარეშე, ბ) ხელის გათვალისწინებით სხვადასხვა სიბრტყეში.

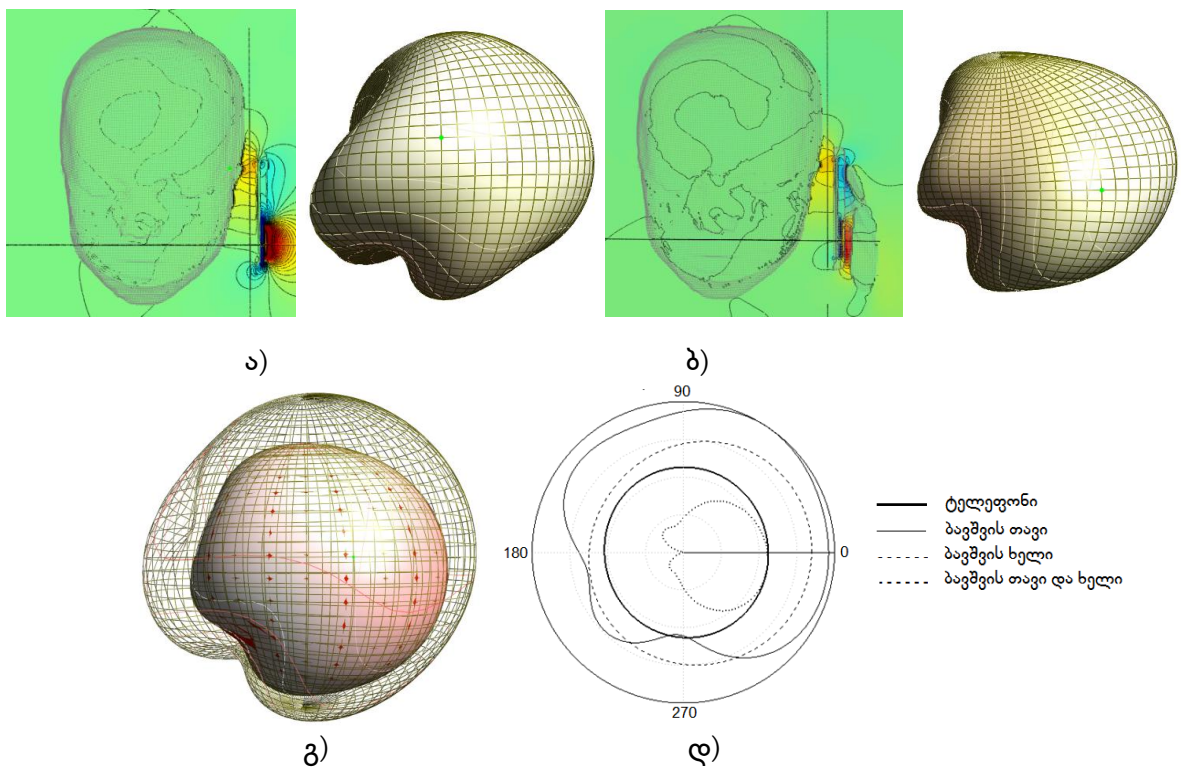
§ 2.2. FDTD მეთოდით მობილური ტელეფონის Patch ანტენით გამოსხივებული ემ ზეგავლენის შესწავლა ზრდასრული ადამიანისა და ბავშვის არაერთგვაროვან მოდელეებზე ხელის სხვადასხვა პოზიციის გათვალისწინებით და მის გარეშე 900, 1900, 3700 მჰც სიხშირეებზე

კვლევის მეთოდების აღწერისას როგორც აღინიშნა, მობილური ტელეფონით გამონვეული ემ დასხივების ზეგავლენის კვლევები ადამიანის არაერთგვაროვან მოდელეებზე ჩატარდა FDTDLab პროგრამული პაკეტით. განხილულ იქნა დასხივების სხვადასხვა შემთხვევები: ხელის გარეშე და ასევე ქალისა და ბავშვის თავის მოდელიდან მობილური ტელეფონის (ხელთან ერთად) სხვადასხვა მანძილით 1მმ და 10მმ-ით დაცილების. ტელეფონის ანტენას წარმოადგენდა ე.წ. patch ტიპის ანტენა, რომელიც მოთავსებულია მის ქვედა ნაწილში. რიცხვითი ექსპერიმენტები ჩატარდა 900, 1900 და 3700 მჰც სტანდარტულ სიხშირეებზე. შესწავლილ იქნა, შორი ველისა და ახლო ველის განაწილება ადამიანის თავის მოდელში. განისაზღვრა ქალისა და ბავშვის ქსოვილებში შთანთქმული ველის ენერჯია (SAR, **იგულისხმება პიკური მნიშვნელობები**) და შეფასებულ იქნა ამ შთანთქმით გამონვეული ტემპერატურის მატება.

სურ. 2.2.1 და სურ. 2.2.2-ზე წარმოდგენილია ელექტრული ველის განაწილებები ახლო ზონაში და შორი ველის დიაგრამები ქალის თავის მოდელისთვის ხელის გარეშე და ხელის (თითების) სხვადასხვა პოზიციის შემთხვევაში, ასევე ბავშვის თავის მოდელისთვის ხელის გათვალისწინებით და მის გარეშე. როგორც ვხედავთ, ხელის გათვალისწინების გარეშე გამოსხივებული ენერჯიის დიდი ნაწილი გადასხივდება ღია სივრცეში, ხოლო დანაჩენი შთანთქმება თავის ქსოვილების მიერ; მაგრამ როდესაც ვითვალისწინებთ ხელს, ტელეფონის მიერ გამოსხივებული ემ ველის ენერჯიის უმეტესი ნაწილი შთანთქმება ხელის მიერ, რაც ამცირებს თავის ქსოვილებში ველის მნიშვნელობებს და ღია სივრცეში გადასხივებული ველის სიდიდეს.

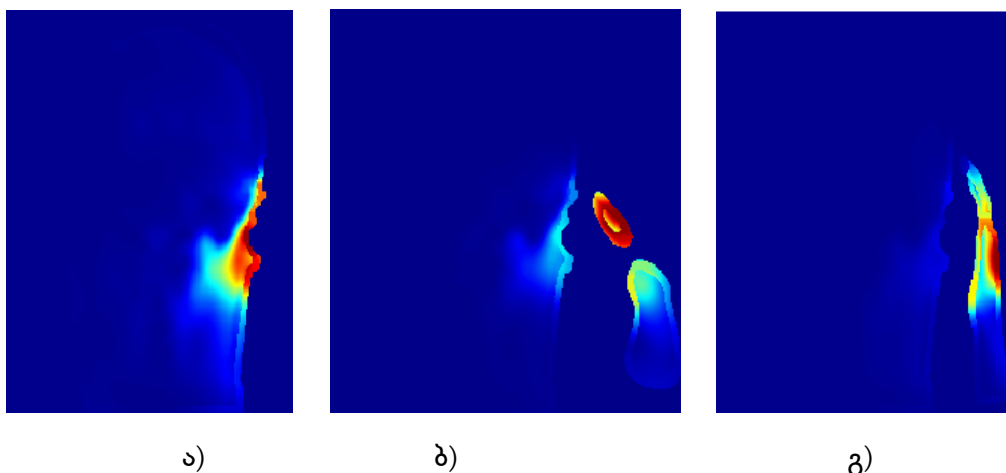


სურ. 2.2.1. ახლო ველის განაწილება და შორი ველის დიაგრამა ქალის მოდელისთვის 900მჰც სიხშირეზე, ა) ხელის გარეშე, ბ) ხელით hand 1, გ) ხელით hand 2.

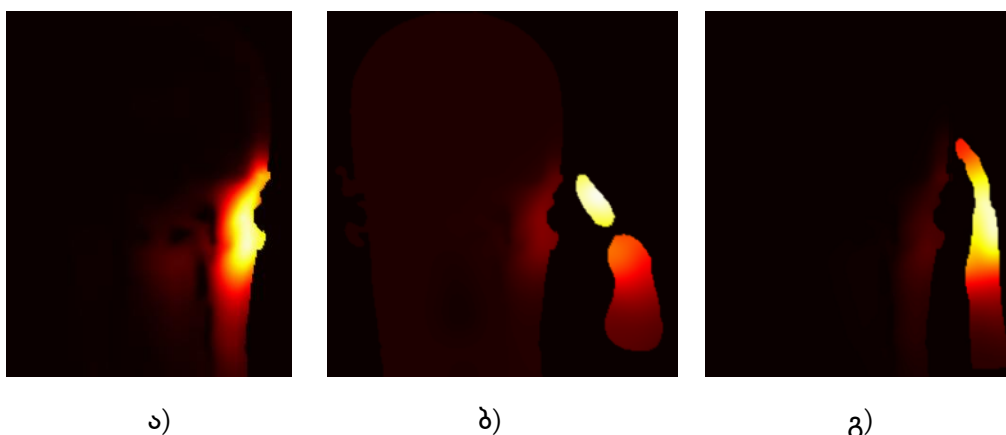


სურ. 2.2.2. ახლო ველის განაწილება და შორი ველის დიაგრამა ბავშვის მოდელისთვის 900მჰც სიხშირეზე: ა) ხელის გარეშე, ბ) ხელის გათვალისწინებით. გ) ხელის გარეშე (გარე) და ხელის გათვალისწინებით (შიდა). დ) ორგანომომილებიანი დიაგრამა.

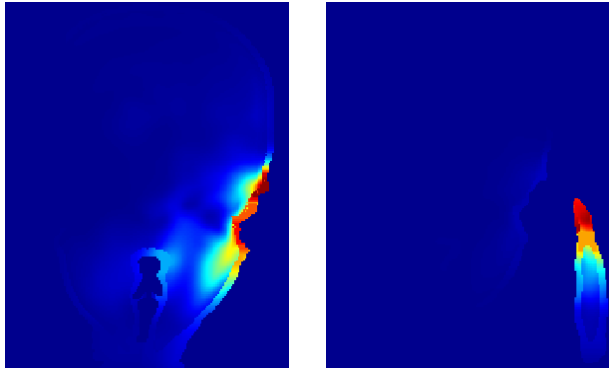
ქალისა და ბავშვის ქსოვილებში შთანთქმული ენერჯის (SAR-ის) განაწილება ნაჩვენებია სურ. 2.2.3 და სურ. 2.2.4-ზე; ხოლო ტემპერატურის მატების განაწილება ქალისა და ბავშვის თავის მოდელებში წარმოდგენილია სურ. 2.2.3.1 და სურ. 2.2.4.1-ზე შესაბამისად.



სურ. 2.2.3. SAR-ის განაწილება ქალის თავის მოდელისთვის 900მჰც სიხშირეზე, ა) ხელის გარეშე, ბ) ხელით hand 1, გ) ხელით hand 2.



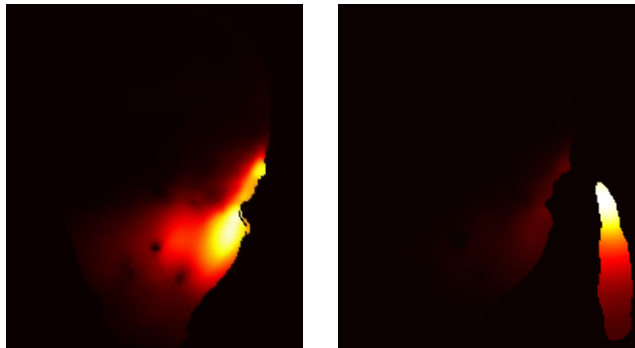
სურ. 2.2.3.1 ტემპერატურის მატების განაწილება ქალის თავის მოდელისთვის 900მჰც სიხშირეზე, ა) ხელის გარეშე, ბ) ხელით hand 1, გ) ხელით hand 2.



ა)

ბ)

სურ. 2.2.4. SAR-ის განაწილება ბავშვის თავის მოდელისთვის 900მჰც სიხშირეზე, ა) ხელის გარეშე, ბ) ხელის გათვალისწინებით.



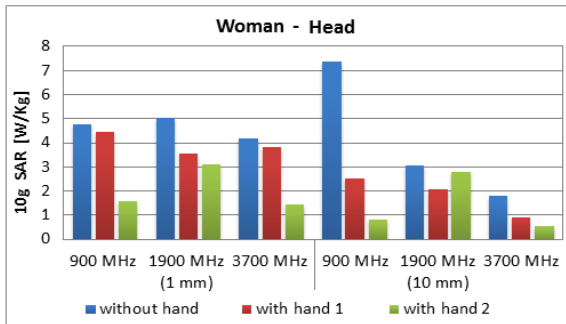
ა)

ბ)

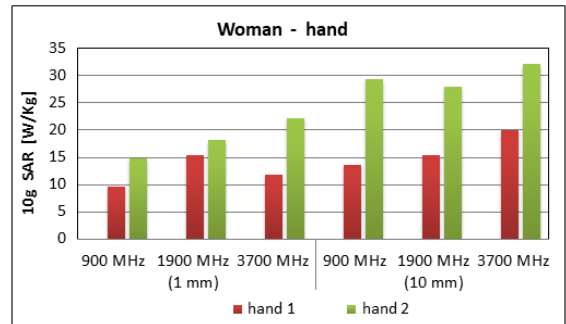
სურ. 2.2.4.1 ტემპერატურის მატების განაწილება ბავშვის თავის მოდელისთვის 900მჰც სიხშირეზე, ა) ხელის გარეშე, ბ) ხელის გათვალისწინებით.

როგორც მიღებული შედეგებიდან ჩანს, როდესაც ვითვალისწინებთ ხელს, SAR-ის პიკური მნიშვნელობები თავის ქსოვილებიდან გადაინაცვლებს ხელში, რადგან ხელი შთანთქავს გამოსხივებული ენერჯის დიდ ნაწილს და SAR-ის მნიშვნელობები თავში მნიშვნელოვნად მცირდება. ეს ეფექტი კარგად ჩანს სურ. 2.2.5 და სურ. 2.2.6, სადაც წარმოდგენილია SAR-ის პიკური მნიშვნელობები ქალის და ბავშვის თავისა და ხელის ქსოვილებში, ტელეფონის (ხელთან ერთად) თავის მოდელეებიდან 1მმ და 10 მმ მანძილით დაშორების შემთხვევაში. მიღებული შედეგები ნორმირებულია 1ვტ შემავალ სიმძლავრეზე. სურ. 2.2.5-დან ასევე ჩანს, რომ SAR-ის პიკური მნიშვნელობები თავში უფრო მცირეა, როცა ტელეფონი დაჭერილია მთლიანი ხელით ეხება ხელისგულს (**hand 2**), ვიდრე როცა ტელეფონი დაჭერილია მხოლოდ თითებით (**hand 1**). SAR-ის მნიშვნელობები ბავშვის ხელში უფრო მეტია, ვიდრე ქალის ხელში, თავში კი

პირიქით. სურ. 2.2.7- ზე წარმოდგენილია ტემპერატურის მატების პიკური მნიშვნელობები ქალისა და ბავშვის თავის მოდელებში.

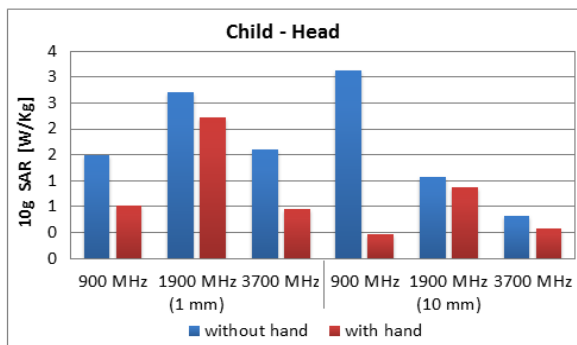


ა)

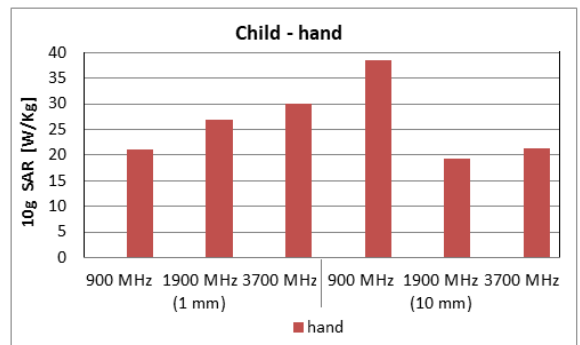


ბ)

სურ. 2.2.5. 10g SAR-ის მნიშვნელობები ა) ქალის თავის ქსოვილებში ხელის გარეშე და ხელის სხვადასხვა პოზიციისას და ბ) ადამიანის ხელის ქსოვილებში, მობილური ტელეფონის თავიდან 1მმ და 10მმ მანძილით დაშორების შემთხვევებისთვის.

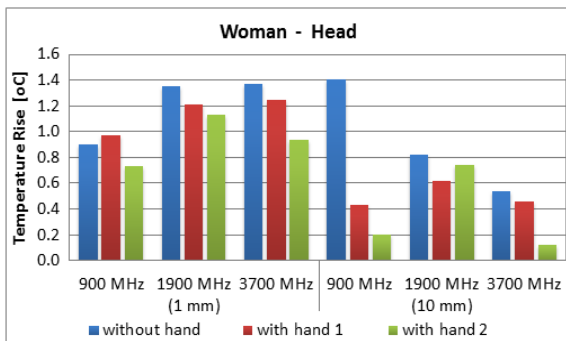


ა)

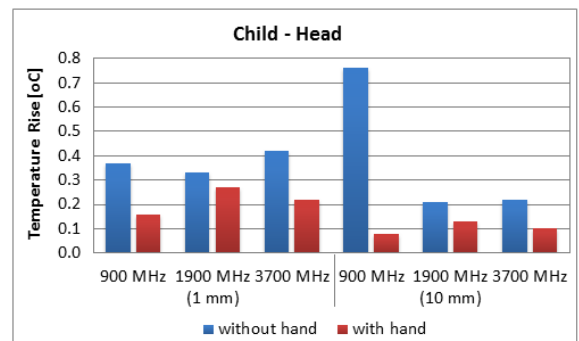


ბ)

სურ. 2.2.6. 10g SAR-ის მნიშვნელობები ა) ბავშვის თავის ქსოვილებში ხელის გარეშე და ხელის გათვალისწინებით და ბ) ბავშვის ხელის ქსოვილებში, მობილური ტელეფონის თავიდან 1მმ და 10მმ მანძილით დაშორების შემთხვევებისთვის.



ა)



ბ)

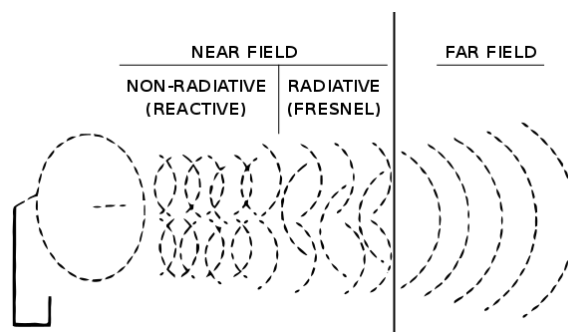
სურ. 2.2.7. ტემპერატურის მატება ა) ქალის თავის ქსოვილებში და ბ) ბავშვის თავის ქსოვილებში, ხელის გარეშე და ხელის გათვალისწინებით.

წარმოდგენილი შედეგები გვიჩვენებს, რომ თუ გავითვალისწინებთ ხელს, SAR-ისა და ტემპერატურის მატების მნიშვნელობები ქალისა და ბავშვის თავის ქსოვილებში შემცირდება. ასევე ჩანს, რომ როცა ტელეფონი დაჭერილია ხელის გულით (**hand 2**) SAR-ისა და ტემპერატურის მატების მნიშვნელობები ქალის თავის მოდელის ქსოვილებში უმეტეს შემთხვევაში თითქმის 2-ჯერ მცირეა, იმ შემთხვევასთან შედარებით, როცა ტელეფონი დაჭერილია თითქმის (**hand 1**); SAR-ის მნიშვნელობები კი ხელისგულში გაცილებით დიდია, ვიდრე თითქმისში; რადგან ხელისგული დიდი ფართობით ეხება ტელეფონის იმ ნაწილს, სადაც მოთავსებულია ანტენა და შთანთქავს მის მიერ გამოსხივებული ენერჯის უმეტეს ნაწილს. ამის გამო თავში ნაკლები ენერჯია შთანთქმება. SAR-ისა და ტემპერატურის ნაზრდის მნიშვნელობები ასევე დამოკიდებულია თავსა და ტელეფონს შორის მანძილზე. კერძოდ, მათი მნიშვნელობები (ერთი-ორი გამონაკლისის გარდა) 10 მმ-ით დაშორების შემთხვევაში უფრო მცირეა, ვიდრე 1მმ-ის შემთხვევაში ფიქსირებულ სიხშირეზე; რაც გამომწვეულია ველის მანძილის კვადრატზე უკუპროპორციული დამოკიდებულებით.

§ 2.3. მობილური ტელეფონის დიპოლური ანტენის თავისუფალ სივრცესთან შეთანხმების დამოკიდებულება ხელის სხვადასხვა პოზიციებზე

შესავალი

ანტენის თეორიიდან [68] ცნობილია, რომ გადამცემი (ასევე მიმღები) ანტენის ველი იყოფა ორ რეგიონად: ახლო და შორ ველებად.



ახლო ველის ზომა დამოკიდებულია მთლიანად გამომსხივებელის ზომასა და ტალღის სიგრძეზე. შორი ველის ზონაში E და H ველები ერთ ფაზაშია და ქმნიან გამრბენ ტალღას, ხოლო მათი ფარდობა უდრის გარემოს (თავისუფალი სივრცის) ტალღურ წინაღობას. ამავდროულად, ანტენის ახლო ველის ზონაში (როგორც მიმღების, ასევე გადამცემის) ცუდი შეთანხმების დროს ჩნდება ძლიერი და მაღალი რიცხვითი მნიშვნელობის მდგარი ტალღის, ანუ რეაქტიული ველები. ამ ზონაში E/H შეფარდება მნიშვნელოვნად იცვლება და დამოკიდებულია ანტენის თავისუფალ გარემოსთან შეთანხმების პირობებზე. რომლის დროსაც იზრდება უკან გენერატორში არეკვლილი ემ ველი და როგორც შედეგი იცვლება S11 კოეფიციენტი.

როგორც ვიცით, მობილურის სიხშირის დიაპაზონში E ველი განსაზღვრავს შთანთქმულ კუთრ სიმძლავრეს SAR-ს ტელეფონის მიხედვით:

$$SAR = \frac{\sigma}{2\rho} E^2$$

σ - ელექტრული გამტარებლობა, ρ - სიმკვრივე.

აქამდე, წინა კვლევებში SAR და ტემპერატურის მატება იყო დანორმირებული ანტენის 1ვატ სიმძლავრეზე. რადგან შთანთქმის კუთრი სიმძლავრე დამოკიდებულია მხოლოდ E ველზე, ამიტომ ძალიან მნიშვნელოვანია E/H შეფარდების მინიმუმამდე დაყვანა. ეს მიიღწევა ანტენის პარამეტრების საუკეთესო შეთანხმებით, როცა რეაქტიული ელექტრული ველის დაძაბულობა არის დაბალი.

რადგან ხელისა და თავის ზომები და მათი მდებარეობა შეგვიძლია შევადაროთ მობილური ტელეფონის დიაპაზონის ტალღის სიგრძეებს, ამიტომ მათი მდებარეობით (პოზიციით) განისაზღვრება გამრბენი ველის პირობა. ნებისმიერი ცვლილება ემ ველის გავრცელების გზაზე წარმოქმნის არეკვლილ ტალღებს, მათი ფაზური წანაცვლება კი მოქმედებს ანტენის შეთანხმებაზე თავისუფალ სივრცესთან. კარგი შეთანხმების შედეგად გვექნება ზუსტად ისეთი გამრბენი ტალღა, რომელიც ობიექტის ზედაპირზე მოედინება კვების წყაროს მინიმალური დაძაბულობით, რაც საჭიროა საბაზო ანტენასთან დასაკავშირებლად. ანტენის ახლო ველის ზონაში ძირითადად რეაქტიული ველებია, რაც იმას ნიშნავს, რომ E და H ველები არ ემთხვევიან ფაზით

ერთმანეთს, განსხვავებით გამრბენი ტალღისაგან, სადაც ველები ურთიერთმართობულია და იმყოფება ერთ ფაზაში.

რეაქტიული ველის საზღვრები განისაზღვრება შემდეგნაირად:

$$R < 0.62 \sqrt{\frac{D^3}{\lambda}} \quad (2.3.1)$$

სადაც, D არის ანტენის მაქსიმალური ზომა, λ – ტალღის სიგრძეა.

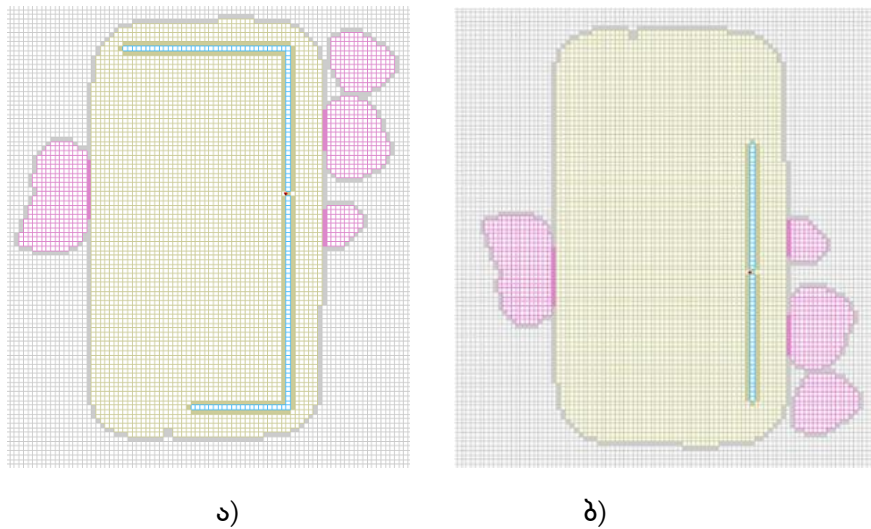
ჩვენი მიზანია შევისწავლოთ, როგორ მოქმედებს თავი და ხელი (მისი პოზიციები და დაცილება თავიდან) ანტენის შეთანხმების პირობებზე (S11-არეკვლის კოეფიციენტი, აღწერს ანტენის შეთანხმებას თავისუფალ სივრცესთან. გვიჩვენებს ენერჯის რა ნაწილი აირეკლა). გამოყენებული პროგრამული პაკეტი საშუალებას გვაძლევს ვიპოვოთ თითოეული განხილული შემთხვევისთვის და სიხშირისათვის S11-კოეფიციენტი და შევაფასოთ როგორ ცვლის თავის და ხელის (თითების პოზიციები) გათვალისწინება ანტენის შეთანხმებას თავისუფალ სივრცესთან.

§ 2.3.1. მობილური ტელეფონის ანტენის თავისუფალ სივრცესთან შეთანხმების გამოკვლევა

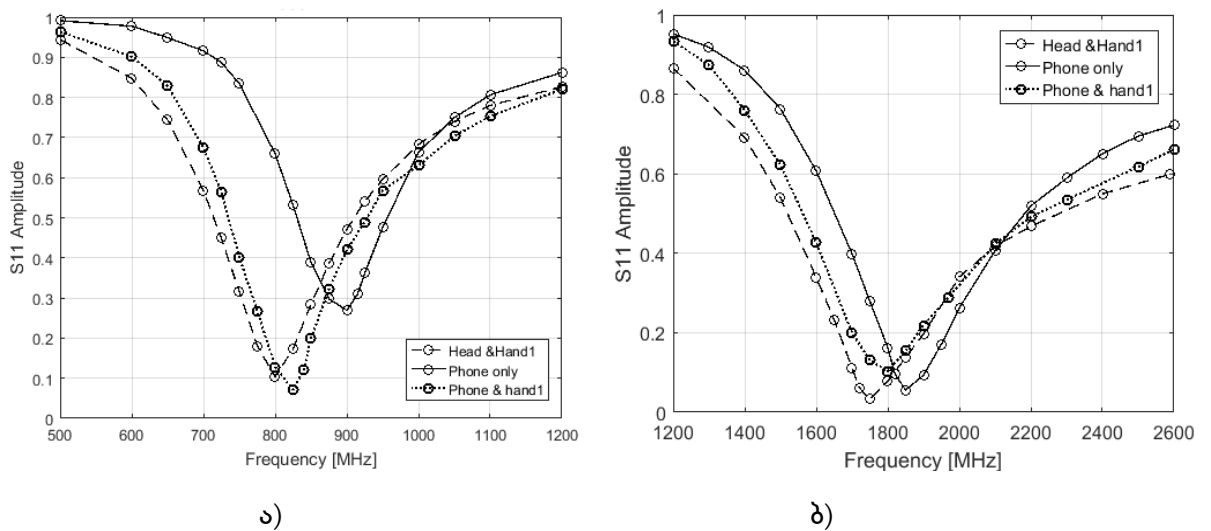
ტელეფონის ანტენის თავისუფალ სივრცესთან შეთანხმების გამოკვლევა ჩატარდა ზრდასრული ადამიანის თავის მოდელზე ხელის ორი პოზიციის გათვალისწინებით (სურ.2.1.4.), როცა ტელეფონი დაჭერილია თავიდან სხვადასხვა მანძილზე (1მმ, 10მმ, 20მმ) მხოლოდ თითებით (**hand 1**) და მთლიანი ხელით, ეხება ხელისგულს (**hand 2**) გამოსხივების 900მჰც და 1900მჰც სიხშირეებზე. ტელეფონის ანტენას წარმოადგენდა დიპოლური ანტენა, რომლის სიგრძე განხილულ სიხშირეებზე შეირჩა ისე, რომ ჰქონოდა მინიმალური არეკვლის კოეფიციენტი (S11) (სურ.2.3.2.), რაც შეესაბამება ანტენის თავისუფალ სივრცესთან საუკეთესო შეთანხმებას. 900მჰც სიხშირისათვის დიპოლის სიგრძე L იყო 137 მმ, ხოლო მინიმალური S11=0.27. 1900მჰც-ზე კი დიპოლის სიგრძე $L=57$ მმ და S11=0.08 (სურ.2.3.1). მიღებულმა შედეგებმა აჩვენა, რომ ორივე შემთხვევაში რიცხვით ექსპერიმენტში თავის და ხელის გათვალისწინება ზრდის S11

კოეფიციენტს. ამავე დროს (ა)-შემთხვევაში ანტენას (თავი-ხელი-ტელეფონი კონფიგურაციისას) აქვს უფრო კარგი შეთანხმება თავისუფალ სივრცესთან ვიდრე დიპოლურ ანტენას ცალკე, ოღონდ მცირედით წანაცვებულ სიხშირეზე.

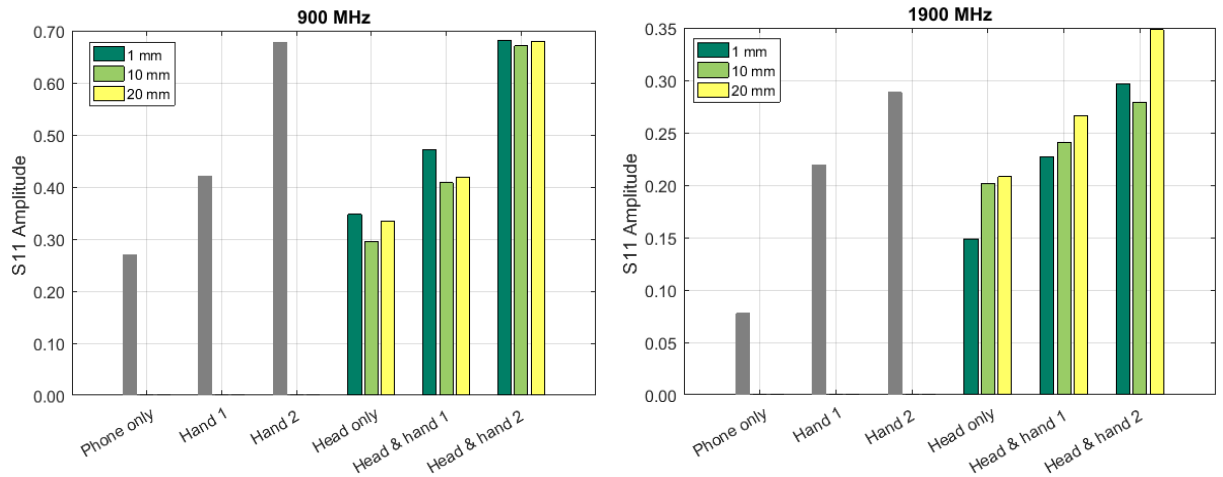
ამის შემდეგ შესწავლილ იქნა S11 კოეფიციენტის ცვლილება ტელეფონზე ხელის სხვადასხვა პოზიციის და თავის ზემოქმედებისას, რომელიც ნაჩვენებია სურ 2.3. 3.



სურ.2.3.1. მობილური ტელეფონის მოდელი შერჩეული სიგრძის დიპოლური ანტენით: ა) 900 მჰც და ბ) 1900მჰც სიხშირეებისათვის.



სურ 2.3. 2. დიპოლური ანტენის სიხშირული მახასიათებელი ა) 900 მჰც და ბ) 1900 მჰც სიხშირეებისათვის.



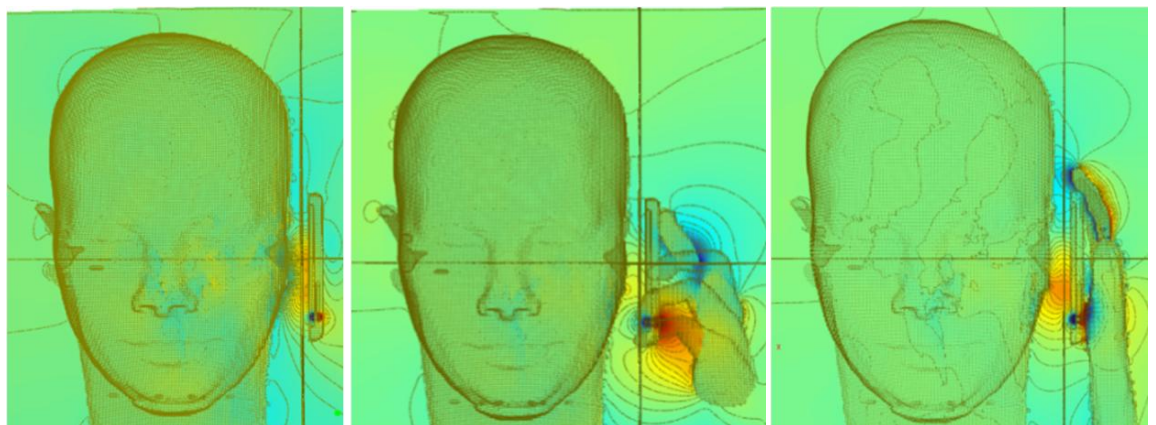
ა)

ბ)

სურ 2.3.3. S11 კოეფიციენტი ადამიანის მოდელის 'თავი-ანტენა-ხელი' სისტემისათვის ა) 900მჰც და ბ) 1900მჰც სიხშირეებზე.

იმ შემთხვევაში, როდესაც მობილური ტელეფონის ანტენა დაფარულია ხელის გულით (hand 2) უფრო ცუდი შეთანხმება დაიმზირება (თავით და თავის გათვალისწინების გარეშე) როგორც 900მჰც, ასევე 1900მჰც სიხშირეზე იმ შემთხვევასთან შედარებით, როდესაც მობილური ტელეფონი დაჭერილია ხელის თითებით (hand 1).

ახლო ემ ველის განაწილება „თავი-ანტენა-ხელი“ მოდელისათვის სხვადასხვა კვეთაში წარმოდგენილია სურ 2.3.4. -ზე.



ა)

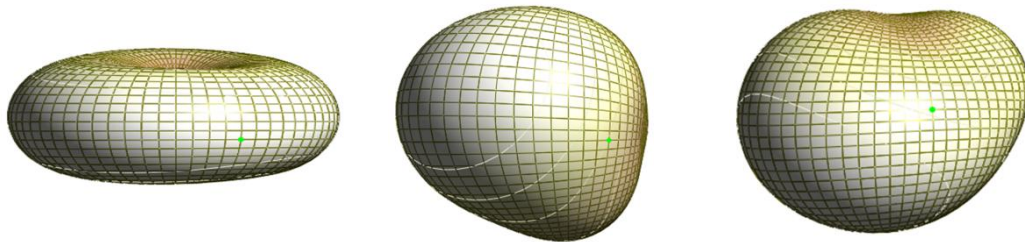
ბ)

გ)

სურ 2.3.4. ახლო ველის განაწილება ადამიანის 'თავი-ანტენა-ხელი' მოდელში 900მჰც სიხშირეზე: ა) ხელის გარეშე, ბ) ხელით Hand 1, გ) ხელით Hand 2.

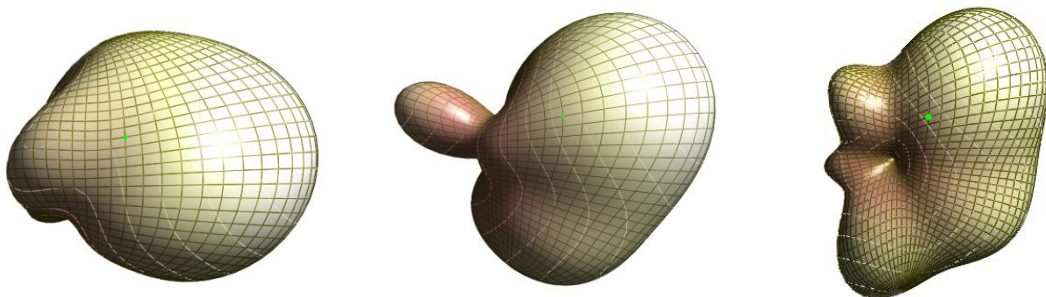
ემ ველის სტრუქტურა მნიშვნელოვნად დამოკიდებულია შესასწავლი მოდელის გეომეტრიაზე. როგორც მიღებულ შედეგებში ფერების განაწილებიდან ჩანს (სურ 2.3.4.), ემ ველის დიდი მნიშვნელობა მიიღება ანტენის უშუალო სიახლოვეს. გამოსხივებული ენერჯის ნაწილი შთაინთქმება ქსოვილების მიერ, რაც გავლენას ახდენს S11 კოეფიციენტზე.

შორი ველის სამგანზომილებიანი დიაგრამები მობილური ტელეფონისათვის თავის გარეშე თავისუფალ სივრცეში და მხოლოდ ტელეფონისათვის ხელის სხვადასხვა პოზიციის გათვალისწინებით 900მჰც სიხშირისათვის წარმოდგენილია სურ 2.3.5-ზე; ხოლო იმ შემთხვევისათვის, როდესაც ვითვალისწინებთ თავს სურ 2.3.6-ზე. შორი ველის ორგანზომილებიანი დიაგრამები ტელეფონზე თავის და ხელის სხვადასხვა პოზიციის ზემოქმედებისას ნაჩვენებია სურ 2.3.7.



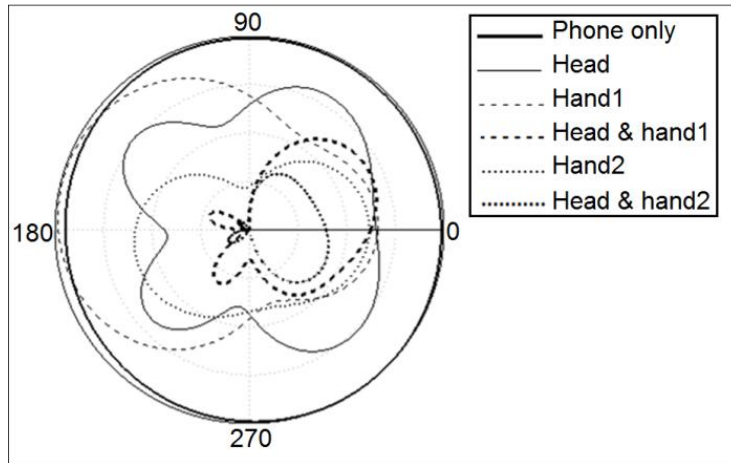
ა) ბ) გ)

სურ 2.3.5. მობილური ტელეფონის ანტენის შორი ველის დიაგრამა 900 მჰც სიხშირეზე: ა) მხოლოდ ტელეფონი, ბ) ხელით Hand 1, გ) ხელით Hand 2.



ა) ბ) გ)

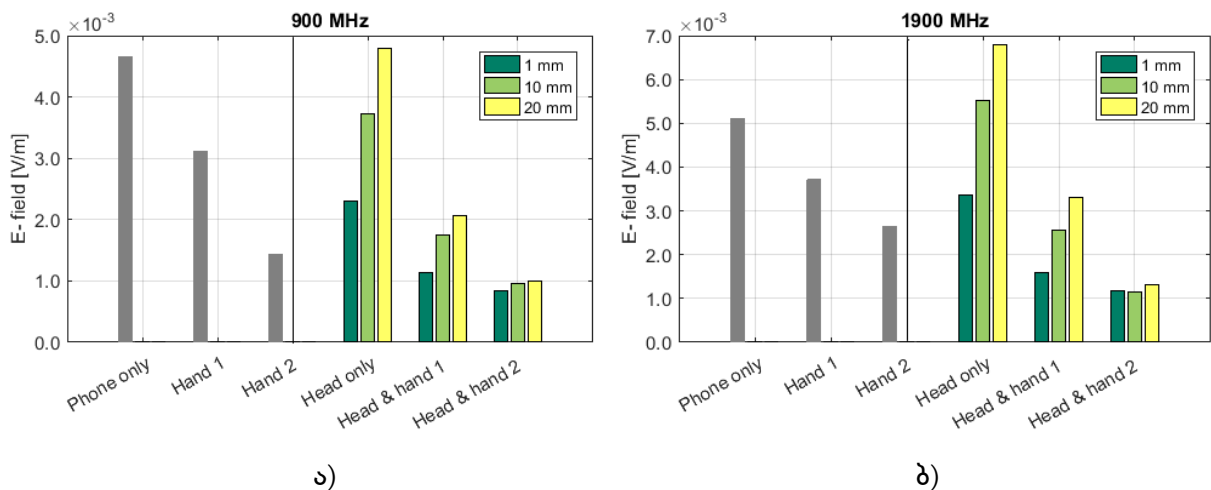
სურ 2.3.6. მობილური ტელეფონის ანტენის შორი ველის დიაგრამა თავის გათვალისწინებით 900 მჰც სიხშირეზე: ა) ხელის გარეშე, ბ) ხელით Hand 1, გ) ხელით Hand 2.



სურ.2.3.7. გამოსხივების დიაგრამა ჰორიზონტალურ კვეთაში „თავი-ანტენა-ხელი“ მოდელისათვის 900მჰც სიხშირეზე.

აღმოჩნდა, რომ გამოსხივების დიაგრამა და სრული გადასხივებული სიმძლავრე ფიქსირებული გაძლიერების კოეფიციენტისათვის მნიშვნელოვნად დამოკიდებულია მოდელირების სცენარზე.

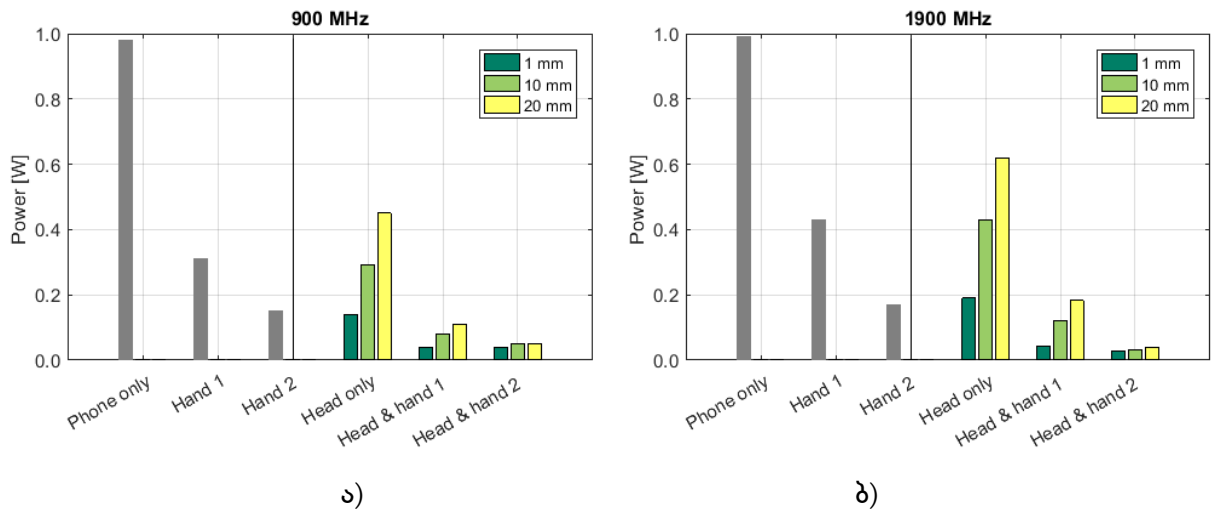
ემ ველის პიკური მნიშვნელობები ადამიანის „თავი-ანტენა-ხელი“ სისტემისათვის 900მჰც სიხშირეზე ნაჩვენებია არის სურ 2.3.8. -ზე.



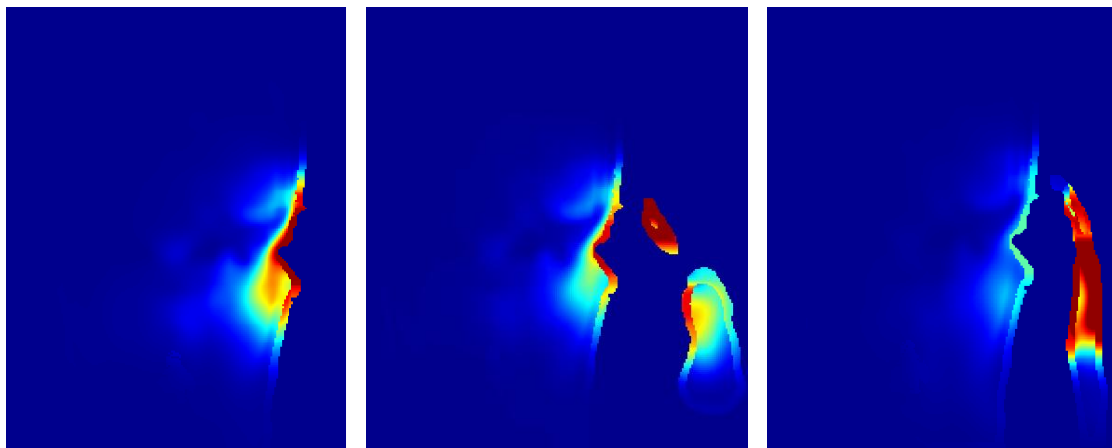
სურ 2.3.8. ემ ველის მნიშვნელობები ადამიანის „თავი-ანტენა-ხელი“ სისტემისათვის: ა) 900მჰც და ბ) 1900მჰც გამოსხივების სიხშირეებზე დიპოლური ანტენის სხვადასხვა მდებარეობისათვის.

მიღებული შედეგებიდან ჩვენ ვხედავთ, რომ ხელის და თავის გათვალისწინება ცვლის გამოსხივების დიაგრამას და გამოსხივების სიმძლავრეს; როდესაც ტელეფონი დაჭერილია თავთან ახლოს და სრულად ფარავს ხელი (hand 2), ამ დროს სრული

გადასხივებული სიმძლავრე მკვეთრად მცირდება, ვიდრე იმ შემთხვევაში, როცა ტელეფონი დაჭერილია მხოლოდ თითებით (**hand 1**) (სურ 2.3.9).

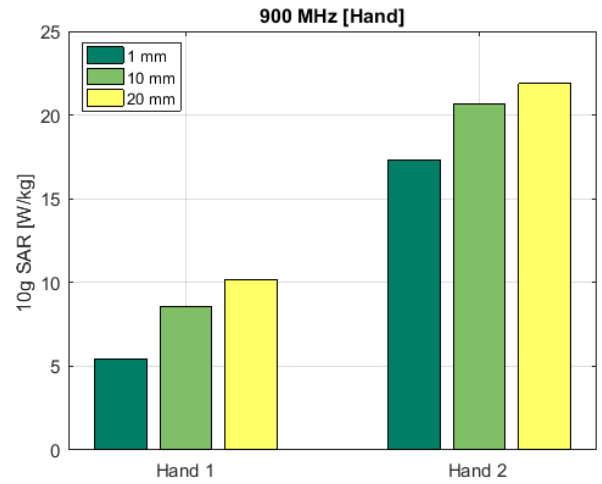
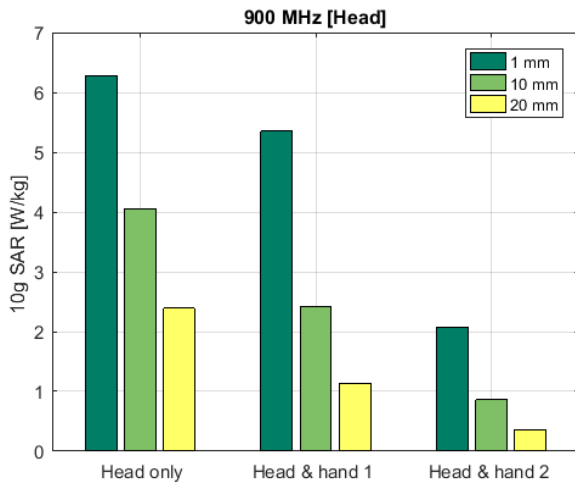


სურ 2.3.9. სრული გადასხივებული სიმძლავრის მნიშვნელობები ადამიანის „თავი-ანტენა-ხელი“ სისტემისათვის: ა) 900მჰც და ბ) 1900მჰც სიხშირეებზე (ნორმირებული 1ვატ-სიმძლავრეზე).



სურ 2.3.10. SAR განაწილება ადამიანის ხელის და თავის მოდელში 900 მჰც სიხშირეზე: ა) ხელის გარეშე, ბ) ხელით Hand 1, გ) ხელით Hand 2.

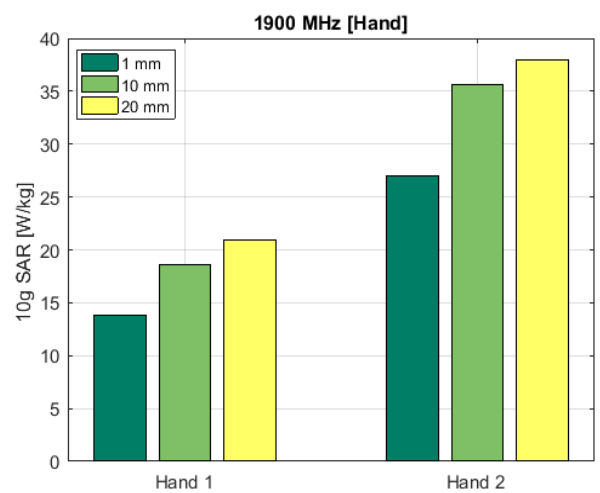
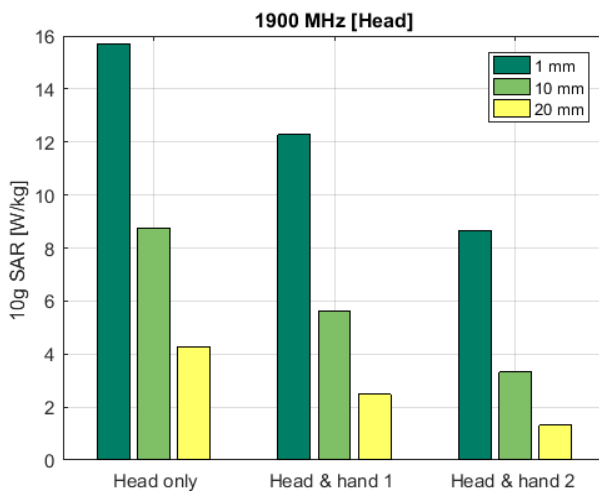
სურ 2.3.10-ზე მოყვანილია წერტილოვანი SAR განაწილება ადამიანის თავის მოდელის შიგნით. როდესაც ხელის არსებობა გათვალისწინებულია, SAR-ის პიკური მნიშვნელობა დაიმზირება ხელში; რადგან ხელი შთანთქმავს ემ ველის ენერჯის დიდ ნაწილს და რის შედეგადაც SAR-ის პიკური მნიშვნელობა თავში მნიშვნელოვნად შემცირებულია. რაც კარგად ჩანს სურ 2.3.11 და სურ 2.3.12-დან.



ა)

ბ)

სურ 2.3.11. 10გ SAR მნიშვნელობები ადამიანის: ა) თავის მოდელის შიგნით და ბ) ხელის მოდელის ქსოვილებში 900 მჰც სიხშირეზე. SAR ნორმირებულია 1 ვატ სიმძლავრეზე.



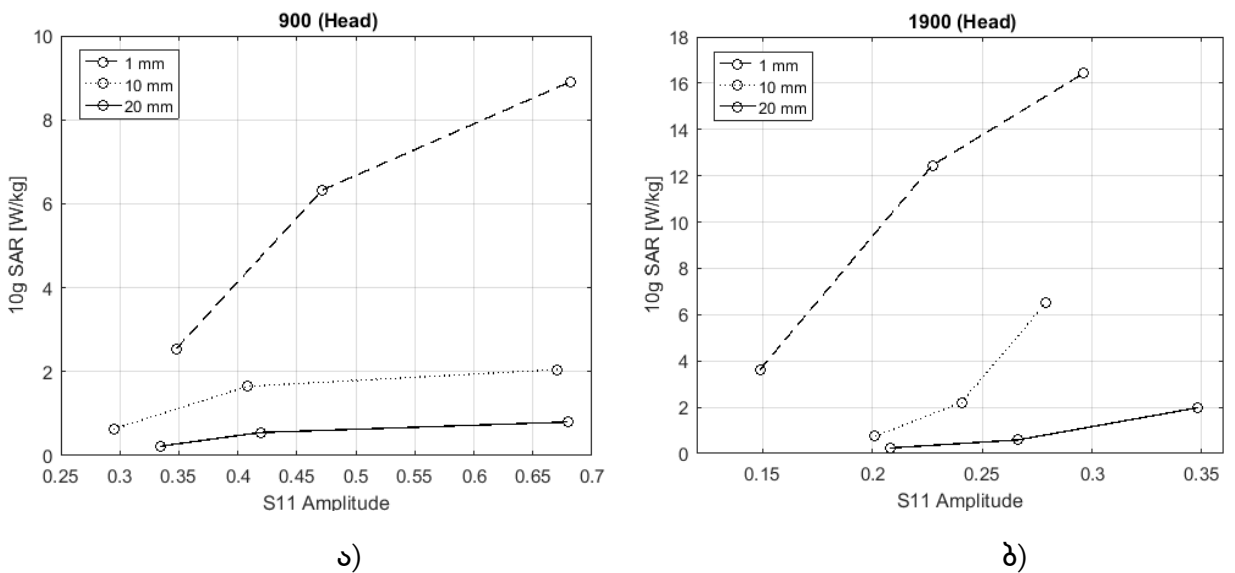
ა)

ბ)

სურ 2.3.12. 10გ SAR მნიშვნელობები ადამიანის: ა) თავის მოდელის შიგნით და ბ) ხელის მოდელის ქსოვილებში 1900 მჰც სიხშირეზე. SAR ნორმირებულია 1 ვატ სიმძლავრეზე.

როგორც მიღებული შედეგებიდან ვხედავთ, რომ 10გ SAR-ის მნიშვნელობები პროპორციულია სიხშირის და უკუპროპორციულია მანძილის თავსა და მობილურ ტელეფონს შორის. 10გ SAR-ის მნიშვნელობა დიდია მაღალი სიხშირეებისათვის. იგი მცირდება დაბალი სიხშირისას და როდესაც მანძილი თავსა და მობილურ ტელეფონს შორის არის დიდი. SAR-ის პიკური მნიშვნელობები თავის ქსოვილებში შემცირებულია, როდესაც ვითვალისწინებთ ხელის არსებობას. თუ ტელეფონის ანტენას დავფარავთ

ხელის გულით, (**hand 2**) SAR-ის პიკური მნიშვნელობა თავში მცირეა იმ შემთხვევასთან შედარებით, როდესაც ტელეფონი დაჭერილია ხელის თითებით (**hand 1**). რაც შეიძლება აიხსნას იმით, რომ გამოსხივებული ენერჯის დიდ ნაწილს შთანთქავს ხელის გული და მხოლოდ ენერჯის მცირე ნაწილი აღწევს ადამიანის თავამდე. თანამედროვე სმარტ-ტელეფონებს აქვთ AGC (Automatic Gain Control) და ავტომატურად ზრდიან გამოსხივების სიმძლავრეს კარგი კავშირის დასამყარებლად, იმ შემთხვევაში როდესაც საბაზო სადგურიდან სიგნალი სუსტდება. სწორედ ამიტომ ანტენის ირგვლივ რეაქტიული ველი იზრდება. რადგან რეაქტიული ველის არე უფრო დიდია ვიდრე მობილური ტელეფონი ხელთან ერთად, ის ფარავს მთელს მახლობელ ობიექტებს ყურს, თავს და ხელს. შედეგად მაღალი რეაქტიული ველისას დიდია შთანთქმა. დამოკიდებულება SAR-ის პიკური მნიშვნელობებისა შეთანხმების პირობებზე (S11 კოეფიციენტზე) წარმოდგენილია სურ 2.3.13. SAR მნიშვნელობები ნორმირებულია ტელეფონის ემ ველის მნიშვნელობაზე თავისუფალ სივრცეში. თითოეულ გრაფიკზე პირველი წერტილი შეესაბამება SAR-ის მნიშვნელობას თავში ხელის გარეშე, მეორე - ხელის **hand 1** პოზიციით, ხოლო მესამე - ხელის **hand 2** პოზიციით.



სურ 2.3.13. 10g SAR დამოკიდებულება S11 კოეფიციენტზე ადამიანის თავის მოდელისათვის: ა) 900მჰც, ბ) 1900მჰც სიხშირეებზე.

როგორც ვხედავთ 10გ SAR მნიშვნელობები დამოკიდებულია ანტენის შეთანხმებაზე თავისუფალ სივრცესთან (S11 კოეფიციენტზე), აგრეთვე მანძილზე თავსა და მობილურ ტელეფონს შორის. მიღებული შედეგებიდან ჩანს, რომ მობილური ტელეფონის ანტენის შეთანხმებაზე თავისუფალ სივრცესთან გავლენას ახდენს ტელეფონის და ხელის პოზიციები (სურ 2.3.13.ა, ბ). აქედან გამომდინარე ჩვენ შეგვიძლია ვივარაუდოთ, რომ ცუდი შეთანხმება არის მიზეზი SAR -ის პიკური მნიშვნელობის ზრდისა ადამიანის თავის და ხელის მოდელეებში. ნათელია, რომ მიღებული შედეგები მნიშვნელოვნად დამოკიდებულია მოდელეების პარამეტრების შერჩევაზე. ხელი, რომლითაც გვიჭირავს საკომუნიკაციო მონაცობილობა, შთანთქავს გამოსხივებული ენერჯის ნაწილს; რის გამოც კარგი კავშირის დასამყარებლად საბაზო სადგურთან, როგორც უკვე აღვნიშნეთ, მობილური ტელეფონის სრული გადასხივებული სიმძლავრე იზრდება. რის შედეგადაც ვლტებულობთ SAR-ის პიკური მნიშვნელობების ზრდას ადამიანის მოდელის თავში.

§2.4. II თავის დასკვნა

კვლევით მიღებულმა შედეგებმა აჩვენა, რომ ხელის არსებობა და მათი სხვადასხვა პოზიცია მნიშვნელოვნად ცვლის გამოსხივების დიაგრამას, და შესაბამისად, ცვლის SAR-ისა და ტემპერატურის მატების მნიშვნელობებს განხილული ადამიანის თავის მოდელეების ქსოვილებში. კერძოდ, ეს მნიშვნელობები უფრო მცირეა, როცა ტელეფონს კარგად ფარავს ხელისგული (Hand 2). თუმცა ამ დროს კომუნიკაციის ხარისხი ეცემა, რადგან ხელისგული შთანთქავს ტელეფონის ანტენის მიერ გამოსხივებული ენერჯის უმეტეს ნაწილს. ყველა განხილული შემთხვევისათვის და სიხშირისათვის, როგორც ზრდასრული ადამიანის ასევე ბავშვის თავის მოდელისათვის, 10გ SAR-ის პიკური მნიშვნელობები საშუალოდ ორჯერ დიდია, როდესაც არ ვითვალისწინებთ ხელის გავლენას, ხელის გათვალისწინებით მიღებულ მის მნიშვნელობებთან შედარებით (ასევე 2-ჯერ აღემატება ზღვრულ დასაშვებ

მნიშვნელობას); ტემპერატურის ნაზრდის მნიშვნელობებს შორის განსხვავება კი- შეადგენს საშუალოდ 10-40%. ტემპერატურის ნაზრდის მნიშვნელობები ზრდასრული ადამიანისათვის დაახლოებით 40%-ით აღემატება ზღვრულ დასაშვებ მნიშვნელობას; ბავშვის მოდელის შემთხვევაში კი -ეს მნიშვნელობები ნორმის ფარგლებშია; რადგან, განხილული ტელეფონის მოდელისათვის, ანტენა ჩაშენებულია ტელეფონის ქვედა ნაწილში და დაცვილებულია ბავშვის თავიდან უფრო დიდი მანძილით, ვიდრე ზრდასრული ადამიანის თავის მოდელის შემთხვევაში.

დადგინდა, რომ ტელეფონის ანტენის შეთანხმება თავისუფალ სივრცესთან მნიშვნელოვანი ასპექტია ადამიანის ემ დასხივების შესწავლისას. ნაჩვენები იქნა, რომ ხელის და თითების პოზიციის ცვლილება ცვლის შეთანხმების პირობებს და მოქმედებს SAR-ის პიკურ მნიშვნელობაზე ადამიანის თავში. SAR-ის პიკური მნიშვნელობა იზრდება სიხშირის ზრდასთან ერთად და მცირდება მანძილის ზრდისას თავსა და ტელეფონს შორის. კერძოდ, ყველაზე ცუდი შეთანხმება დაიმზირება, როდესაც მობილური ტელეფონის ანტენა დაფარულია ხელის გულით (Hand 2) და მანძილი ადამიანის თავსა და მობილურ ტელეფონს (ხელთან ერთად) შორის არის 20მმ 1900 მჰც-ის შემთხვევაში, ხოლო 1მმ 900 მჰც-ის შემთხვევაში; S11 კოეფიციენტის (რომელიც აღწერს ანტენის თავისუფალ სივრცესთან შეთანხმებას) ამპლიტუდური მნიშვნელობა 900მჰც სიხშირისათვის არის 0.7, რაც 2.5-ჯერ დიდია მის მნიშვნელობაზე მხოლოდ ანტენისათვის (როცა განხილულ ანტენას აქვს კარგი შეთანხმება თავისუფალ სივრცესთან); ხოლო 1900მჰც-ის შემთხვევაში კი- S11 კოეფიციენტის ამპლიტუდური მნიშვნელობა დაახლოებით 4-ჯერ აღემატება მის მნიშვნელობას, როდესაც განხილულ ანტენას აქვს საუკეთესო შეთანხმება. მიღებული ნიშნავს, რომ ხელის პოზიცია, რომლითაც დაჭერილია მობილური ტელეფონი (ასევე დაცვილების მანძილი), მნიშვნელოვნად მოქმედებს გამოსხივების პროცესზე.

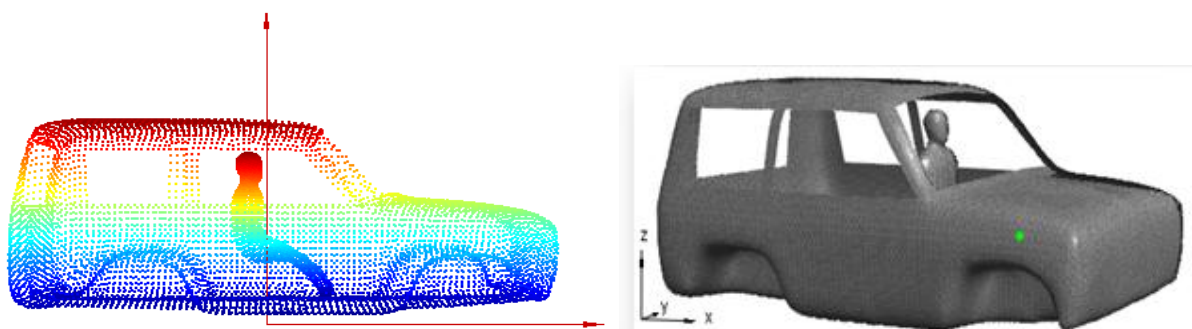
ანტენის სიახლოვეს მყოფი დიელექტრიკული ობიექტი მნიშვნელოვან ზეგავლენას ახდენს მის შეთანხმებაზე თავისუფალ სივრცესთან. ზოგიერთ შემთხვევაში ხელი, ან თითების სხვადასხვა პოზიცია, ამცირებს S11 კოეფიციენტს (გვაქვს კარგი შეთანხმება

მცირედით წანაცვლებულ სიხშირეებზე, როცა არ ვითვალისწინებთ ადამიანის თავის გავლენას). დადგენილ იქნა, რომ ემ ველის მნიშვნელობები ახლო ზონაში და შესაბამისად SAR-ის პიკური მნიშვნელობა ძლიერად დამოკიდებულია S11 პარამეტრსა (შეთანხმება) და „თავი-ანტენა-ხელი“ სისტემის კონფიგურაციაზე. S11 პარამეტრის მნიშვნელობის ზრდისას, ორივე განხილული სიხშირისათვის, იზრდება SAR-ის მნიშვნელობები ადამიანის თავში. კერძოდ, როდესაც ტელეფონის დაჭერილია ისე, რომ ხელის გული ფარავს ანტენას (1მმ დაცილებისას) S11 პარამეტრის მნიშვნელობა არის მაქსიმალური (ანტენის ყველაზე ცუდი შეთანხმება თავისუფალ სივრცესთან) SAR-ის პიკური მნიშვნელობა თავში თითქმის 4-ჯერ დიდია, SAR-ის იმ პიკურ მნიშვნელობებზე, როდესაც განხილულ ანტენას აქვს საუკეთესო შეთანხმება, ორივე განხილული სიხშირისათვის. ამ შემთხვევაში 900 მჰც სიხშირისათვის SAR-ის პიკური მნიშვნელობა ადამიანის თავის მოდელის ქსოვილებში 4-ჯერ, ხოლო 1900მჰც სიხშირეზე კი 8-ჯერ აღემატება ზღვრულ დასაშვებ მნიშვნელობას. რაც არის შედეგი იმისა, რომ თანამედროვე ტელეფონები ავტომატურად ზრდიან გამოსხივების სიმძლავრეს კარგი კავშირის მისაღწევად, რაც იწვევს ტელეფონის გარშემო არასასურველი რეაქტიული ველის ფორმირებას; რაც იწვევს SAR-ის მნიშვნელობების გაზრდას ადამიანის მოდელის თავის ქსოვილებში.

თავი III. დამხმარე გამომსახვებლების მეთოდით მობილური ტელეფონის და საბაზო სადგურის ანტენის მიერ გამოსხივებული ემ ველის ზეგავლენის შესწავლა ადამიანის ერთგვაროვან მოდელზე მანქანაში

§ 3.1. შესავალი

სადისერტაციო ნაშრომის მოცემულ თავში, მობილური ტელეფონისა და საბაზო სადგურის ანტენის ემ ზეგავლენის შესასწავლად ადამიანზე, რომელიც იმყოფება მანქანაში, და ამ სისტემის რეზონანსული თვისებების გამოსაკვლევად გამოყენებულ იქნა დამხმარე გამომსახვებლების მეთოდი (დგმ). იგი შემუშავებულ იქნა ქართველი მათემატიკოსის ვ.კუპრაძის მიერ და შემდეგ განვითარდა გამოყენებითი ელექტროდინამიკისა და რადიოტექნიკის ლაბორატორიაში (თსუ) დიფრაქციის ამოცანების ამოსახსნელად. დგმ-ით გამოსაკვლევია ობიექტები უნდა იყოს ერთგვაროვანი აგებულების და გლუვი გეომეტრიის მქონე, ამიტომ 3D MAX-ში მომზადდა ადამიანის გასაშუალოებული ერთგვაროვანი მოდელი (გააჩნია დიელექტრიკული შეღწევადობის და გამტარებლობის გასაშუალოებული მნიშვნელობები კუნთის, ძვლის და ცხიმის მიხედვით, ცხრილი.3.1.1.) და ავტომობილის მოდელი გლუვი გეომეტრიებით (სურ. 3.1.1). დგმ მეთოდი ასევე საშუალებას გვაძლევს გამოვთვალოთ ძირითადი გასაშუალოებული მახასიათებლები, და განვიხილოთ, ძირითადი ელექტროდინამიკური მოვლენები, რომლებსაც ადგილი აქვს ემ გამოსხივების ადამიანზე ზემოქმედებისას.



სურ.3.1.1. მანქანის და ადამიანის 3D მოდელები.

სიხშირე	გასაშუალოებული დიელექტრიკული შეღწევადობა	გასაშუალოებული ელექტრული გამტარებლობა
450 მჰც	45.7	0.63
900 მჰც	44.3	0.74
1800 მჰც	43	1.07

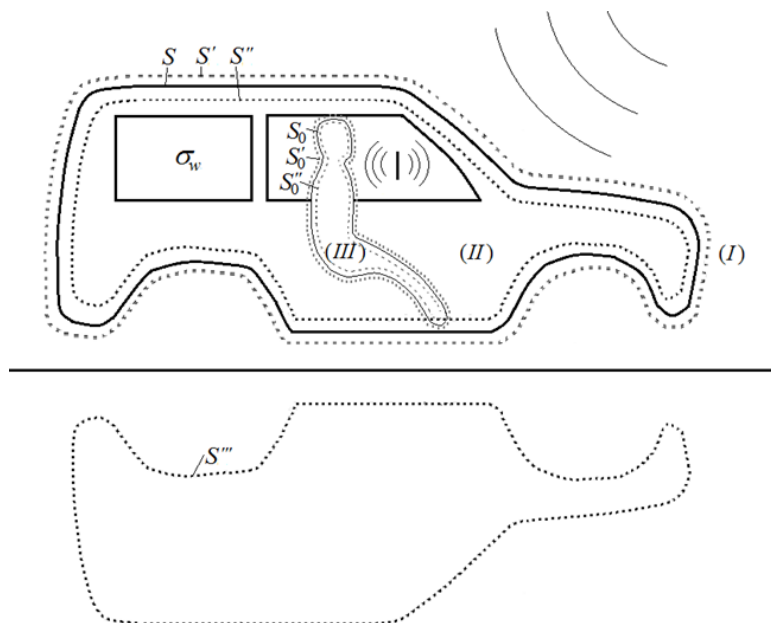
ცხრილი.3.1.1. ადამიანის ერთგვაროვანი მოდელის დიელექტრიკული შეღწევადობა და ელექტრული გამტარებლობა განხილული სიხშირეების მიხედვით.

ამოცანის ამოხსნისას გათვალისწინებულია, რომ ეს სიდედეები დამოკიდებულია სიხშირეზე. თანჯრის ღია ნაწილების ზედაპირი განიხილება, როგორც თავისუფალი სივრცე, ჰაერის შეღწევადობით. ემ ველის წყაროდ კი ვიყენებთ ელემენტარულ დიპოლს.

სადისერტაციო ნაშრომის ამ თავში წარმოდგენილ კვლევაში სიახლეს წარმოადგენს ის, რომ გათვალისწინებულია დედამიწის, როგორც ამრეკლი ზედაპირის გავლენა მანქანის შიგნით ველის ფორმირების პროცესში 450, 900 და 1800[მჰც] სიხშირეებზე (სტანდარტული საკომუნიკაციო სიხშირეები) და გამოკვლეულია მოცემული სისტემისათვის ახლო ველის განაწილება, გამოსხივების დიაგრამა; SAR-ისა და ველის განაწილება ადამიანის თავში, შევისწავლეთ სისტემის „მანქანა+ადამიანი“ რეზონანსული თვისებები.

§3.2. დამხმარე გამომსხივებლების მეთოდის გამოყენება ადამიანზე ემ ზეგავლენის შესასწავლად მანქანაში

განვიხილოთ სისტემა, რომელიც შედგება მანქანისა და მასში მოთავსებული ადამიანის ერთგვაროვანი მოდელისაგან, რომელიც სხივდება ემ ტალღით. ემ ველი აღწევს სისტემის შიგნით. ჩვენი მიზანია, ვიპოვოთ ემ ველის განაწილება მანქანის, ადამიანის მოდელის შიგნით და გარეთ. ვიხილავთ ორ შემთხვევას, როდესაც ემ წყაროს წარმოადგენს მობილური ტელეფონის ანტენა და საბაზო სადგურის ანტენა.



სურ. 3.2.1. დგმ გამოყენება, დედამიანის ზედაპირის გათვალისწინებით

განხილულ მოდელში (სურ.3.2.1.) მანქანა წარმოადგენს იდეალურად გამტარ ზედაპირს S . რომელსაც გააჩნია ღია არეები ფანჯრების სახით σ_w , $w=1,2,\dots$ - ფანჯრების რაოდენობას გვიჩვენებს. როგორც უკვე ავლნიშნეთ, ადამიანის მოდელად ავიღეთ ერთგვაროვანი დიელექტრიკი (დანაკარგებით), რომელიც შემოსაზღვრულია S_0 ჩაკეტილი ზედაპირით. შიდა წყაროს $\vec{E}_{inc}^1, \vec{H}_{inc}^1$ (პირველი შემთხვევა) და გარე წყაროს $\vec{E}_{inc}^2, \vec{H}_{inc}^2$ (მეორე შემთხვევა) გადასხივებული ველები თავდაპირველად არიან მოცემულნი. ჩვენ უნდა განვსაზღვროთ ველი სამ არეში: 1) მანქანის გარეთ (I), 2) მანქანის შიგნით (II), 3) ადამიანის მოდელის შიგნით (III) (სურ.3.2.1).

ავლნიშნოთ ეს ველები $\vec{E}_{(I)}, \vec{H}_{(I)}, \vec{E}_{(II)}, \vec{H}_{(II)}, \vec{E}_{(III)}, \vec{H}_{(III)}$ - შესაბამისად. დასმული ამოცანა იხსება კომპიუტერული მოდელირებით დამხმარე გამომსხივებლების მეთოდის გამოყენებით. დგმ- გამოყენება გულისხმობს, რომ უნდა ავაგოთ წყვილი დამხმარე ზედაპირებისა: S'_0, S''_0 - ადამიანის მოდელის გარეთ და შიგნით და S', S'' - მანქანის გარეთ და შიგნით, რაზეც დამხმარე წყაროები არიან განაწილებულნი. დამხმარე წყაროებად განვიხილეთ ორი ერთნაირი, ურთიერთმართობული, კომბინირებული დიპოლი უცნობი ამპლიტუდებით, რომელთა ორიენტაცია ემთხვევა განხილული ზედაპირის ტანგენციალურ ვექტორს.

კომბინირებული დიპოლები (ჰიუგენსის წყაროები) [29,30], როგორც ვიცით წარმოადგენენ ჰერცის ელექტრული და მაგნიტური დიპოლების კომბინაციას. კომბინირებული დიპოლის ელექტრული და მაგნიტური ველი ავლნიშნოთ შემდეგნაირად:

$$\vec{G}_E(\vec{r}, \vec{r}_0, \vec{p}_e, \vec{p}_h, \varepsilon, \mu), \vec{G}_H(\vec{r}, \vec{r}_0, \vec{p}_e, \vec{p}_h, \varepsilon, \mu) \quad (3.2.1.)$$

სადაც \vec{r} - დაკვირვების წერტილის რადიუს -ვექტორი, ხოლო \vec{r}_0 -იმ წერტილის რადიუს-ვექტორი, სადაც დიპოლი მდებარეობს, \vec{p}_e და \vec{p}_h - ელექტრული და მაგნიტური დიპოლების პოლარიზაციის ერთეულოვანი ვექტორები. ε და μ კი განხილული გარემოს პარამეტრები. იმისათვის, რომ დამხმარე ზედაპირის ნებისმიერ წერტილში აღვწეროთ ნებისმიერი პოლარიზაციის გაბნეული ველი, ჩვენ ვიხილავთ ორ ისეთ დიპოლს, რომლებიც არიან მხებ სიბრტყეში და ბრუნავენ 90° -ით ერთმანეთის მიმართ.

შესაბამისად, დამხმარე წყაროს ელექტრულ და მაგნიტურ ველს აქვს სახე:

$$A_0 \vec{G}_E(\vec{r}, \vec{r}_0, \vec{p}_e, \vec{p}_h, \varepsilon, \mu) + B_0 \vec{G}_E(\vec{r}, \vec{r}_0, \vec{p}'_e, \vec{p}'_h, \varepsilon, \mu) \quad ,$$

$$A_0 \vec{G}_H(\vec{r}, \vec{r}_0, \vec{p}_e, \vec{p}_h, \varepsilon, \mu) + B_0 \vec{G}_H(\vec{r}, \vec{r}_0, \vec{p}'_e, \vec{p}'_h, \varepsilon, \mu), \quad (3.2.2)$$

სადაც: $\vec{p}'_e = \vec{p}_h$, $\vec{p}'_h = -\vec{p}_e$, A_0 და B_0 არიან უცნობი კომპლექსური ამპლიტუდები, რომლებიც შეიძლება განისაზღვრონ შესაბამისი სასაზღვრო პირობების დაკმაყოფილებით.

S'_0 და S''_0 ზედაპირებზე დამხმარე წყაროების რაოდენობა ტოლია $N_0 - S_0$ - ზედაპირზე კოლოკაციის წერტილების რაოდენობის. შესაბამისად, S' და S'' - ზე უდრის N - კოლოკაციის წერტილების რაოდენობა S -ზედაპირზე. N_0 და N წარმოადგენენ დამხმარე პარამეტრებს, რომლებიც შეიძლება შეირჩეს თავიდანვე, ამონახსნის სასურველი სიზუსტის მიხედვით. δ'_0 , δ''_0 და δ' , δ'' - დამხმარე პარამეტრები გვიჩვენებენ S'_0 , S''_0 და S' , S'' ზედაპირების დაცილების ზომას S_0 და S - ზედაპირებიდან შესაბამისად. იმის გამო, რომ განხილულ სტრუქტურას აქვს ჩაზნექილ-ამოზნექილი ფორმა, ამიტომ δ'_0 , δ''_0 და δ' , δ'' უნდა შეირჩეს ფრთხილად, გაბნეული

და საკუთარი ველების განსაკუთრებულების გათვალისწინებით [30]. კვლევებმა ასევე აჩვენა, რომ დამხმარე ზედაპირები უნდა მოიცავდეს გაბნეული ველის სინგულარობას, რაც ამცირებს რიცხვითი გამოთვლების დროსა და ცდომილებას. ამ შემთხვევაში ზედაპირის სიმრუდის მინიმალური რადიუსი განსაზღვრავს დამხმარე ზედაპირის მაქსიმალური დასაშვებ დაცილებას. რაც მოთავსებულია საზღვრებში $0.2\lambda \dots 0.3\lambda$.

ველი (I)- არეში წარმოადგენს ჯამს დაცემული ველის $\vec{E}_{inc}^1, \vec{H}_{inc}^1$ და ველის რომელიც აღინერება დამხმარე წყაროებით S'' -ზედაპირზე. ველი (II) არეში არის ჯამი დაცემული ველის $\vec{E}_{inc}^2, \vec{H}_{inc}^2$ და ველების რომელიც აღინერება S' და S_0'' - ზედაპირებზე განლაგებული წყაროებით. (III)- არეში კი ველი აღინერება S_0' - ზედაპირზე განლაგებული წყაროებით (სურ. 3.2.1.).

მაშასადამე:

$$\vec{E}_{(I)}(\vec{r}) = \vec{E}_{inc}^1(\vec{r}) + \sum_{n=1}^N \left[A_n \vec{G}_E(\vec{r}, \vec{r}_n, \vec{p}_e, \vec{p}_h, \epsilon_0, \mu_0) + B_n \vec{G}_E(\vec{r}, \vec{r}_n, \vec{p}'_e, \vec{p}'_h, \epsilon_0, \mu_0) \right]_{\vec{r}_n \in S''}, \quad (3.2.3.)$$

$$\vec{E}_{(II)}(\vec{r}) = \vec{E}_{inc}^2(\vec{r}) + \sum_{n=1}^N \left[C_n \vec{G}_E(\vec{r}, \vec{r}_n, \vec{p}_e, \vec{p}_h, \epsilon_0, \mu_0) + D_n \vec{G}_E(\vec{r}, \vec{r}_n, \vec{p}'_e, \vec{p}'_h, \epsilon_0, \mu_0) \right]_{\vec{r}_n \in S'} + \sum_{m=1}^{N_0} \left[E_m \vec{G}_E(\vec{r}, \vec{r}_m, \vec{p}_e, \vec{p}_h, \epsilon_0, \mu_0) + F_m \vec{G}_E(\vec{r}, \vec{r}_m, \vec{p}'_e, \vec{p}'_h, \epsilon_0, \mu_0) \right]_{\vec{r}_m \in S_0''}, \quad (3.2.4.)$$

$$\vec{E}_{(III)}(\vec{r}) = \sum_{m=1}^{N_0} \left[K_m \vec{G}_E(\vec{r}, \vec{r}_m, \vec{p}_e, \vec{p}_h, \epsilon, \mu) + L_m \vec{G}_E(\vec{r}, \vec{r}_m, \vec{p}'_e, \vec{p}'_h, \epsilon, \mu) \right]_{\vec{r}_m \in S_0'}, \quad (3.2.5.)$$

$$\vec{H}_{(I)}(\vec{r}) = \vec{H}_{inc}^1(\vec{r}) + \sum_{n=1}^N \left[A_n \vec{G}_H(\vec{r}, \vec{r}_n, \vec{p}_e, \vec{p}_h, \epsilon_0, \mu_0) + B_n \vec{G}_H(\vec{r}, \vec{r}_n, \vec{p}'_e, \vec{p}'_h, \epsilon_0, \mu_0) \right]_{\vec{r}_n \in S''}, \quad (3.2.6.)$$

$$\vec{H}_{(II)}(\vec{r}) = \vec{H}_{inc}^2(\vec{r}) + \sum_{n=1}^N \left[C_n \vec{G}_H(\vec{r}, \vec{r}_n, \vec{p}_e, \vec{p}_h, \epsilon_0, \mu_0) + D_n \vec{G}_H(\vec{r}, \vec{r}_n, \vec{p}'_e, \vec{p}'_h, \epsilon_0, \mu_0) \right]_{\vec{r}_n \in S'} + \sum_{m=1}^{N_0} \left[E_m \vec{G}_H(\vec{r}, \vec{r}_m, \vec{p}_e, \vec{p}_h, \epsilon_0, \mu_0) + F_m \vec{G}_H(\vec{r}, \vec{r}_m, \vec{p}'_e, \vec{p}'_h, \epsilon_0, \mu_0) \right]_{\vec{r}_m \in S_0''}, \quad (3.2.7.)$$

$$\vec{H}_{(III)}(\vec{r}) = \sum_{m=1}^{N_0} \left[K_m \vec{G}_H(\vec{r}, \vec{r}_m, \vec{p}_e, \vec{p}_h, \epsilon, \mu) + L_m \vec{G}_H(\vec{r}, \vec{r}_m, \vec{p}'_e, \vec{p}'_h, \epsilon, \mu) \right]_{\vec{r}_m \in S_0'}. \quad (3.2.8.)$$

მოცემულ გამოსახულებებში გვაქვს დამხმარე წყაროების უცნობი კომპლექსური ამპლიტუდები $A_n, B_n, C_n, D_n, E_m, F_m, K_m, L_m$, რომელთა საერთო რაოდენობაა $4 \cdot (N + N_0)$. ეს ამპლიტუდები შეიძლება განისაზღვრონ სასაზღვრო პირობებით,

რომელსაც უნდა აკმაყოფილებდეს ველები ზედაპირზე S , S_0 და σ_w , $w=1,2,\dots$ - კოლოკაციის წერტილებში.

S -ზედაპირზე, როგორც გამტარზე, $\vec{E}_{(I)}$ და $\vec{E}_{(II)}$ ველების ტანგენციალური კომპონენტი უნდა იყოს ნულის ტოლი:

$$\vec{E}_{(I)}(\vec{r}_\alpha) \cdot \vec{\tau}_\alpha^1 = 0, \quad \vec{E}_{(II)}(\vec{r}_\alpha) \cdot \vec{\tau}_\alpha^1 = 0, \quad (3.2.9.)$$

$$\vec{E}_{(I)}(\vec{r}_\alpha) \cdot \vec{\tau}_\alpha^2 = 0, \quad \vec{E}_{(II)}(\vec{r}_\alpha) \cdot \vec{\tau}_\alpha^2 = 0, \quad (3.2.10.)$$

$$\vec{r}_\alpha \in S, \quad \alpha = 1, 2, \dots, N \setminus N_w,$$

სადაც N_w -წერტილების რაოდენობაა σ_w - ზედაპირზე.

σ_w -ფანჯრის ზედაპირზე, როგორც ორი დიელექტრიკული არის საზღვარზე (ერთნაირი პარამეტრებით), ტანგენციალური კომპონენტი $\vec{E}_{(I)}, \vec{E}_{(II)}$ და $\vec{H}_{(I)}, \vec{H}_{(II)}$ ველების უნდა იყოს უწყვეტი:

$$\vec{E}_{(I)}(\vec{r}_\beta) \cdot \vec{\tau}_\beta^1 = \vec{E}_{(II)}(\vec{r}_\beta) \cdot \vec{\tau}_\beta^1, \quad \vec{E}_{(I)}(\vec{r}_\beta) \cdot \vec{\tau}_\beta^2 = \vec{E}_{(II)}(\vec{r}_\beta) \cdot \vec{\tau}_\beta^2, \quad (3.2.11.)$$

$$\vec{H}_{(I)}(\vec{r}_\beta) \cdot \vec{\tau}_\beta^1 = \vec{H}_{(II)}(\vec{r}_\beta) \cdot \vec{\tau}_\beta^1, \quad \vec{H}_{(I)}(\vec{r}_\beta) \cdot \vec{\tau}_\beta^2 = \vec{H}_{(II)}(\vec{r}_\beta) \cdot \vec{\tau}_\beta^2, \quad (3.2.12.)$$

$$\vec{r}_\beta \in \sigma_w, \quad \beta = 1, 2, \dots, N_w.$$

S_0 -ზედაპირზე $\vec{E}_{(I)}, \vec{E}_{(II)}$ და $\vec{H}_{(I)}, \vec{H}_{(II)}$ ველების ტანგენციალური კომპონენტები უნდა იყოს უწყვეტი:

$$\vec{E}_{(I)}(\vec{r}_\gamma) \cdot \vec{\tau}_\gamma^1 = \vec{E}_{(II)}(\vec{r}_\gamma) \cdot \vec{\tau}_\gamma^1, \quad \vec{E}_{(I)}(\vec{r}_\gamma) \cdot \vec{\tau}_\gamma^2 = \vec{E}_{(II)}(\vec{r}_\gamma) \cdot \vec{\tau}_\gamma^2, \quad (3.2.13.)$$

$$\vec{H}_{(I)}(\vec{r}_\gamma) \cdot \vec{\tau}_\gamma^1 = \vec{H}_{(II)}(\vec{r}_\gamma) \cdot \vec{\tau}_\gamma^1, \quad \vec{H}_{(I)}(\vec{r}_\gamma) \cdot \vec{\tau}_\gamma^2 = \vec{H}_{(II)}(\vec{r}_\gamma) \cdot \vec{\tau}_\gamma^2, \quad (3.2.14.)$$

$$\vec{r}_\gamma \in S_0, \quad \gamma = 1, 2, \dots, N_0.$$

შედეგად, ვიღებთ წრფივ ალგებრულ განტოლებათა სისტემას, რომელთა რაოდენობა ემთხვევა უცნობი ამპლიტუდების რაოდენობას. რადგან სასაზღვრო პირობების დაკმაყოფილება მოითხოვება ორი დამოუკიდებელი $\vec{\tau}^1$ და $\vec{\tau}^2$ მიმართულებით, ამიტომ ეს სისტემა არის სრული. მიღებული განტოლებათა სისტემის ამოხსნით

კომპიუტერის გამოყენებით, შევძლებთ უცნობი ველები განვსაზღვროთ ყველა განხილულ არეში.

როგორც ზემოთ ავღნიშნეთ, საინტერესოა დედანირის ზედაპირის გავლენის შესწავლა ემ ველის ფორმირების პროცესში. ჩავთვალოთ, რომ მიწის ზედაპირი არის იდეალურად გამტარი ბრტყელი ზედაპირი, რამაც საშუალება მოგვცა გამოგვეყენებინა სარკული გამოსახულების მეთოდი, რათა აღგვეწერა გაბნეული ველი. გაბნეული (არეკვლილი) ველის გათვალისწინება აჩენს დამატებით წევრებს (3.2.3.) და (3.2.6.)- გამოსახულებებში, (ველისთვის პირველ არეში). მეორე და მესამე არეში ველებისათვის არეკვლილი ველის გათვალისწინება მხოლოდ ცვლის დამხმარე წყაროების ამპლიტუდებს და ველის ზოგად მათემატიკურ გამოსახულება არ იცვლება.

დგმ- ის მიხედვით, მიწის ზედაპირის მეორე მხარეს გვაქვს S'' - ზედაპირის S''' - სარკული გამოსახულება (სურ.3.2.1.). დამხმარე წყაროების ამპლიტუდები S''' - ზედაპირზე განსხვავდებიან მხოლოდ ნიშნით S'' -ზე განლაგებული დამხმარე წყაროების ამპლიტუდებისგან (სარკული გამოსახულება). სხვა სიტყვებით, რომ ვთქვათ, მიწის ზედაპირის გათვალისწინება არ ცვლის უცნობი ამპლიტუდების რიცხვს და ველს პირველ არეში აქვს სახე:

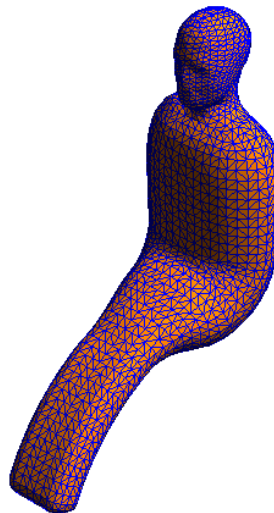
$$\vec{E}_{(I)}(\vec{r}) = \vec{E}_{inc}^1(\vec{r}) + \sum_{n=1}^N \left[A_n \vec{G}_E(\vec{r}, \vec{r}_n, \vec{p}_e, \vec{p}_h, \varepsilon_0, \mu_0) + B_n \vec{G}_E(\vec{r}, \vec{r}_n, \vec{p}'_e, \vec{p}'_h, \varepsilon_0, \mu_0) \right]_{\vec{r}_n \in S''} + \sum_{n=1}^N \left[(-A_n) \vec{G}_E(\vec{r}, \vec{r}_n, \vec{p}^*_e, \vec{p}^*_h, \varepsilon_0, \mu_0) + (-B_n) \vec{G}_E(\vec{r}, \vec{r}_n, \vec{p}'^*_e, \vec{p}'^*_h, \varepsilon_0, \mu_0) \right]_{\vec{r}_n \in S'''} \quad (3.2.15.)$$

$$\vec{H}_{(I)}(\vec{r}) = \vec{H}_{inc}^1(\vec{r}) + \sum_{n=1}^N \left[A_n \vec{G}_E(\vec{r}, \vec{r}_n, \vec{p}_e, \vec{p}_h, \varepsilon_0, \mu_0) + B_n \vec{G}_E(\vec{r}, \vec{r}_n, \vec{p}'_e, \vec{p}'_h, \varepsilon_0, \mu_0) \right]_{\vec{r}_n \in S''} + \sum_{n=1}^N \left[(-A_n) \vec{G}_E(\vec{r}, \vec{r}_n, \vec{p}^*_e, \vec{p}^*_h, \varepsilon_0, \mu_0) + (-B_n) \vec{G}_E(\vec{r}, \vec{r}_n, \vec{p}'^*_e, \vec{p}'^*_h, \varepsilon_0, \mu_0) \right]_{\vec{r}_n \in S'''} \quad (3.2.16.)$$

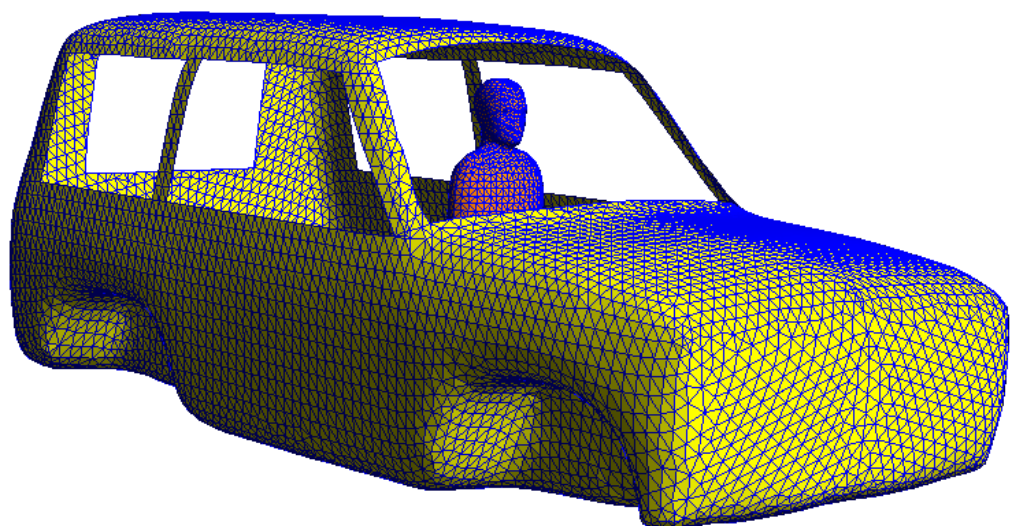
უცნობ ამპლიტუდებს ვპოულობთ სასაზღვრო პირობებიდან (3.2.9-14), მხოლოდ იმ განსხვავებით, რომ $\vec{E}_{(I)}, \vec{H}_{(I)}$ განისაზღვრება (3.2.15) და (3.2.16) გამოსახულებებიდან.

§3.3. მოდელების მომზადება გამოთვლებისათვის. პროგრამული პაკეტი

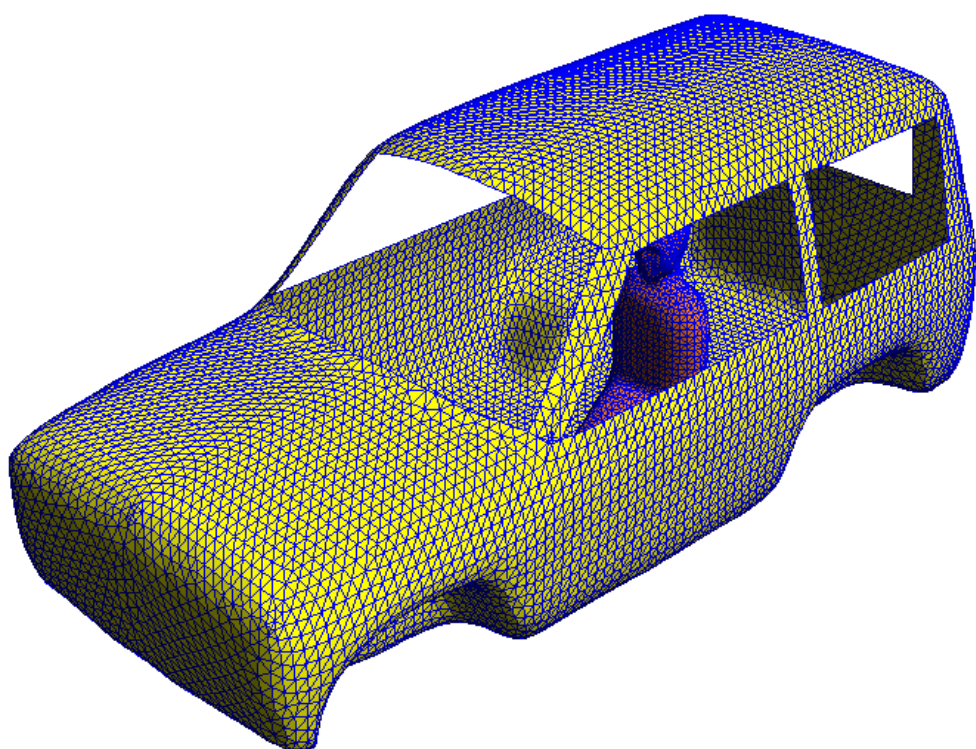
დამხმარე გამომსხივებლების მეთოდით გამოსაკვლევი ობიექტები უნდა იყოს ერთგვაროვანი აგებულების და გლუვი გეომეტრიის მქონე. ამიტომ მეთოდის სპეციფიკიდან გამომდინარე გრაფიკული პროგრამების Autodesk 3ds MAX და Autodesk Netfabb-ის საშუალებით, მომზადდა ადამიანის გასაშუალოებული ერთგვაროვანი მოდელი (ე.წ. „მუმია“), მჯდომარე მდგომარეობაში (სურ.3.3.1), ასევე ავტომანქანის მოდელი (სურ. 3.3.2, სურ.3.3.3) .stl ფორმატში. ამის შემდეგ, ღებ მეთოდის გამოსაყენებლად და გამოთვლების ჩასატარებლად, მოხდა .stl ფორმატიდან გადასვლა .plr ფორმატზე, სადაც ადამიანისა და მანქანის გეომეტრიები წარმოდგენილია წერტილებით. სურ.3.3.4-ზე წარმოდგენილია ავტომანქანისა და ადამიანის მოდელები .plr ფორმატში.



სურ. 3.3.1 ადამიანის ერთგვაროვანი მოდელი .stl ფორმატში.

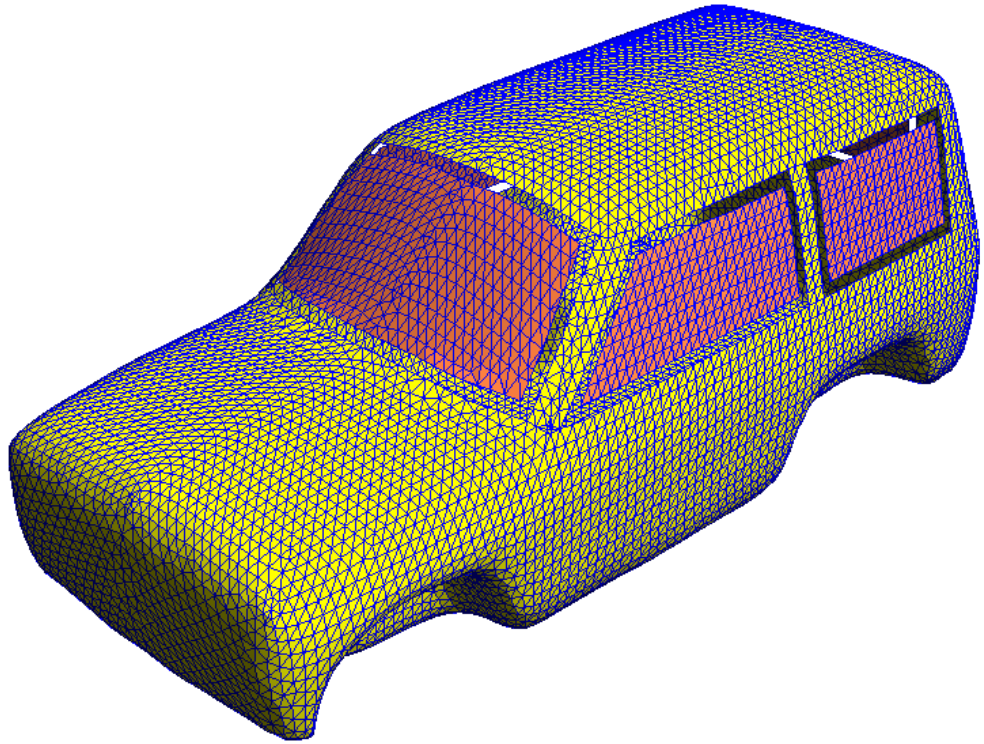


ა)

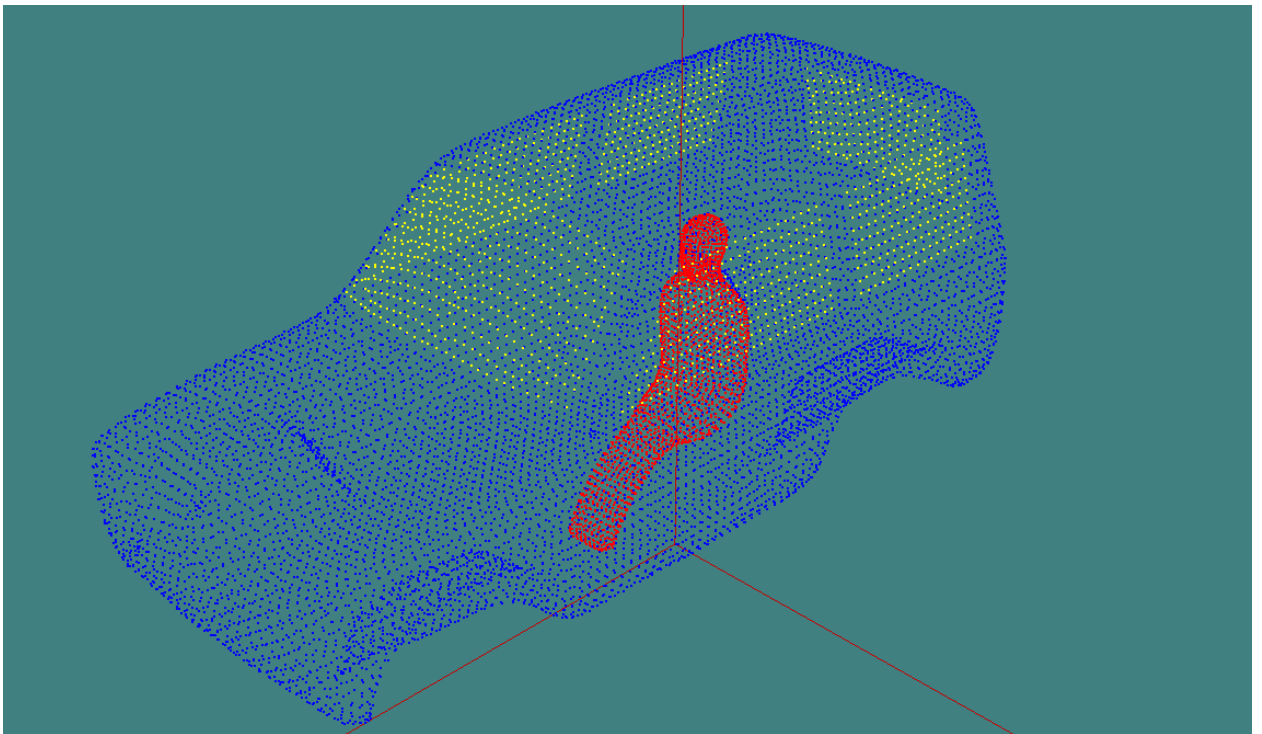


ბ)

სურ. 3.3.2. მანქანის 3D მოდელი მასში მოთავსებული ადამიანის მოდელით სხვადასხვა ხედით, .stl ფორმატში.

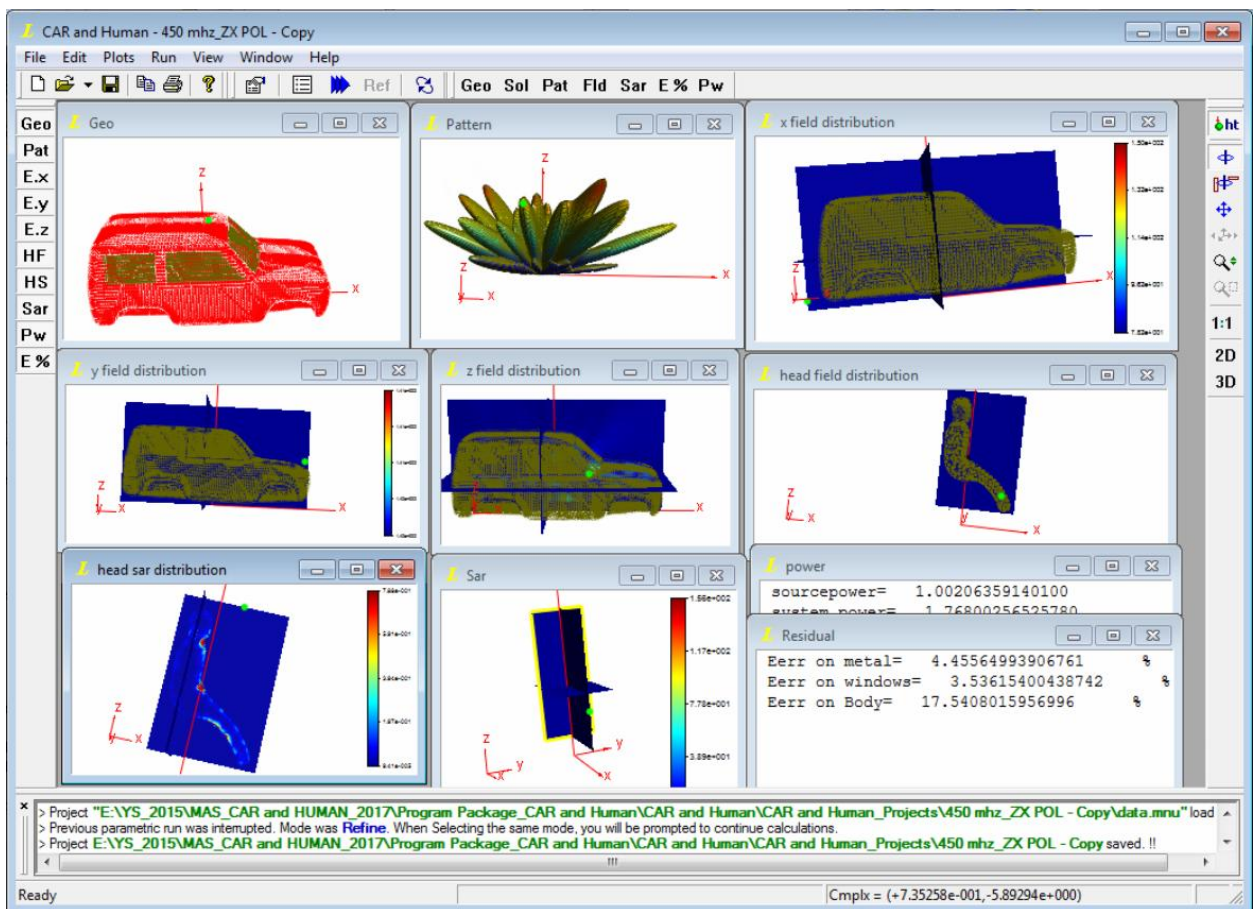


სურ. 3.3.3. მანქანის 3D მოდელი ფანჯრებით .stl ფორმატში



სურ. 3.3.4. მანქანის და ადამიანის 3D მოდელი ფანჯრებით .plr ფორმატში

დამხმარე გამომსხივებლების მეთოდის გამოყენებით შეიქმნა (ზემოთ აღწერილ მეთოდოლოგიაზე დაყრდნობით) ადვილად მართვადი პროგრამული პაკეტი ემ დასხივების შესასწავლად მანქანაში მყოფ ადამიანზე, როგორც საბაზო სადგურის, ასევე მობილური ტელეფონით დასხივების შემთხვევაში. პროგრამული პაკეტი საშუალებას გვაძლევს განვსაზღვროთ ველების განაწილება მანქანის შიგნით, მანქანის გარეთ და ადამიანის მოდელის შიგნით; შევაფასოთ შორი ველის დიაგრამა; გამოვთვალოთ SAR-ის მნიშვნელობები ადამიანის მოდელისათვის, შევისწავლოთ, როგორ არის დამოკიდებული მისი მნიშვნელობები წყაროს მდებარეობაზე და პოლარიზაციაზე მანქანის შიგნით; ვიპოვოთ დენების განაწილება მანქანის შიდა და გარე ზედაპირებზე დამოუკიდებლად; ავაგოთ სიხშირული მახასიათებელი და გამოვიკვლიოთ მისი რეზონანსული თვისებები (სურ.3.3.5.-ზე წარმოდგენილია პროგრამული პაკეტის 'ინტერფეისი')



სურ.3.3.5. პროგრამული პაკეტი

აღგებრულ განტოლებათა სისტემის ამოსახსნელად, რომელიც მიიღება დიფერენციალურ (ადამიანის მოდელი და ფანჯარა) და გამტარზე (მანქანის ზედაპირი) სასაზღვრო პირობების დაკმაყოფილებისას ველის მდგენელებისათვის, გამოყენებულ იქნა MKL ბიბლიოთეკა (სპეციალური ქვეპროგრამა). მნიშვნელოვან პარამეტრს, კარგი გამოთვლითი შედეგის მისაღწევად წარმოადგენს მანძილი ძირითად ზედაპირსა და დამხმარე ზედაპირებს შორის. ოპტიმალური დამხმარე ზედაპირების აგება დეტალურად შესწავლილია შრომაში [69], რომლის საფუძველზეც განხორციელდა კვლევები. გამოთვლის ცდომილების შესამოწმებლად ფასდებოდა სასაზღვრო პირობების შესრულების სიზუსტე.

§3.4. განხილული მოდელები, მიღებული შედეგები და მათი ანალიზი

ზემოთ აღწერილი პროგრამული პაკეტი საშუალებას გვაძლევს ვცვალოთ გამომსახვებელი სისტემის პარამეტრები. განვიხილოთ ორი შემთხვევა: 1) ასხივებს მობილური ტელეფონის ანტენა, რომლის სიმძლავრეა 1ვტ და მდებარეობს ავტომობილის შიგნით 2,5სმ მანძილზე ადამიანის თავიდან (მარჯვენა მხარეს). 2) გამომსახვებელ წყაროს წარმოადგენს საბაზო სადგურის ანტენა, რომლის სიმძლავრეა 80ვტ და მდებარეობს 20მ მანძილზე ავტომობილიდან, 15მ სიმაღლეზე დედამიწის ზედაპირიდან. რიცხვითი ექსპერიმენტი ჩატარდა 450, 900, 1800 [მჰც] სიხშირეებზე. ექსპერიმენტისათვის გამოყენებულ ადამიანის მოდელს გააჩნია შემდეგი ზომები: სიმაღლე 1,67მ, მხრების სიგანე 46სმ, თავის დიამეტრი 17,5სმ. მანქანის ძარის ზომაა $4.10 \times 1.76 \times 1.57$ მ. დაცობა მიწის ზედაპირიდან მანქანის ქვედა ნაწილამდე არის 21სმ.

დათვლები ჩატარდა დედამიწის ზედაპირის გათვალისწინებით და მისი გათვალისწინების გარეშე. შევისწავლეთ ემ ველი ავტომობილის შიგნით და გარეთ, მანქანაზე აღძრული ზედაპირული დენების ხასიათი, ასევე SAR-ის განაწილება

ადამიანის მოდელის შიგნით და გადასხივებული სიმძლავრის სიხშირეზე დამოკიდებულება.

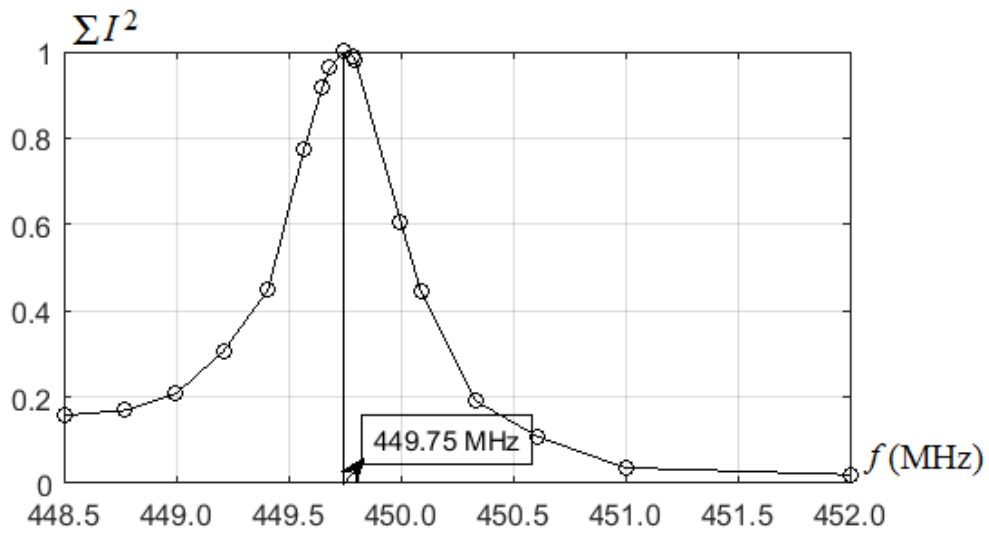
რიცხვითი დათვლების შესრულებისას მოხდა ასევე ცდომილების დაანგარიშება, როგორც საშუალო კვადრატული გადახრა სასაზღვრო პირობების შესრულების კოლოკაციის წერტილებს შორის. ქვემოთ მოყვანილი რიცხვითი შედეგების ცდომილება არ აღემატება 10-15% -ს.

§3.4.1. მობილური ტელეფონის გამოსხივების ემ ველის ზეგავლენის შესწავლა ადამიანის მოდელზე მანქანაში

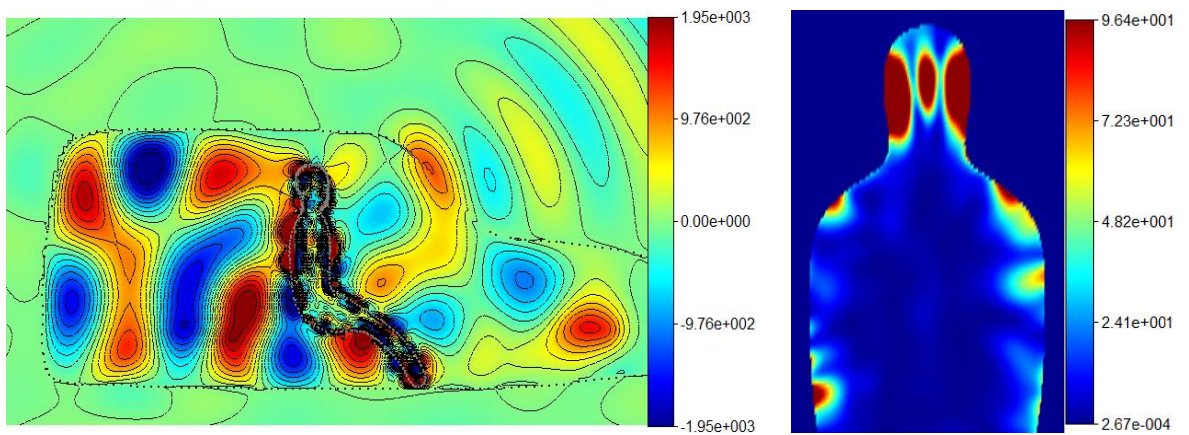
სურ.3.4.1.-ზე მოყვანილია რეზონანსული მახასიათებელი, ნორმირებული შიდა ზედაპირზე აღძრული დენების კვადრატების ჯამის მაქსიმუმზე, 450 მჰც-ის მახლობლად, რომელიც შეესაბამება რაციის სამუშაო დიაპაზონს. ზემოთ ნაჩვენები სისტემის პარამეტრების შემთხვევაში, შესწავლილ ვიწრო დიაპაზონში, რეზონანსი დაიკვირვება 449.75მჰც სიხშირეზე. ცხადია, უფრო განიერ დიაპაზონში იარსებებს სხვა რეზონანსებიც.

როგორც რეზონანსულ, ასევე არარეზონანსულ სიხშირეებზე შესწავლილ იქნა ველის განაწილება ავტომობილის შიგნით, გარეთ და ადამიანის მოდელში, ასევე SAR-ს განაწილება ადამიანის მოდელში (სურ.3.4.2- 5) (სურათზე „რულერი“ უჩვენებს ველის მაქსიმალურ ამპლიტუდურ მნიშვნელობას, რომელიც ადამიანის თავის მოდელთან ახლოს მდებარეობს). მიღებული შედეგები გვიჩვენებს, რომ რეზონანსულ სიხშირეზე ემ ველის განაწილება თითქმის ერთი რიგით მეტია ვიდრე არარეზონანსულ სიხშირეზე, რომელზეც მოცემულ მრუდს გააჩნია მინიმუმი; SAR-ს პიკური მნიშვნელობა კი რეზონანსულ სიხშირეზე თითქმის 5-ჯერ მეტია. ამ შემთხვევაში ტალღის სიგრძე თითქმის ფანჯრის ზომისაა და მანქანის შიგნით ფორმირდება ველი მაღალი ამპლიტუდით. როგორც ვხედავთ, დაბალ სიხშირეზე ემ ველი ღრმად აღწევს

ადამიანის მოდელის შიგნით, რასაც მივყავართ SAR-ის მნიშვნელობის ზრდამდე ადამიანის მოდელის შიგნით.



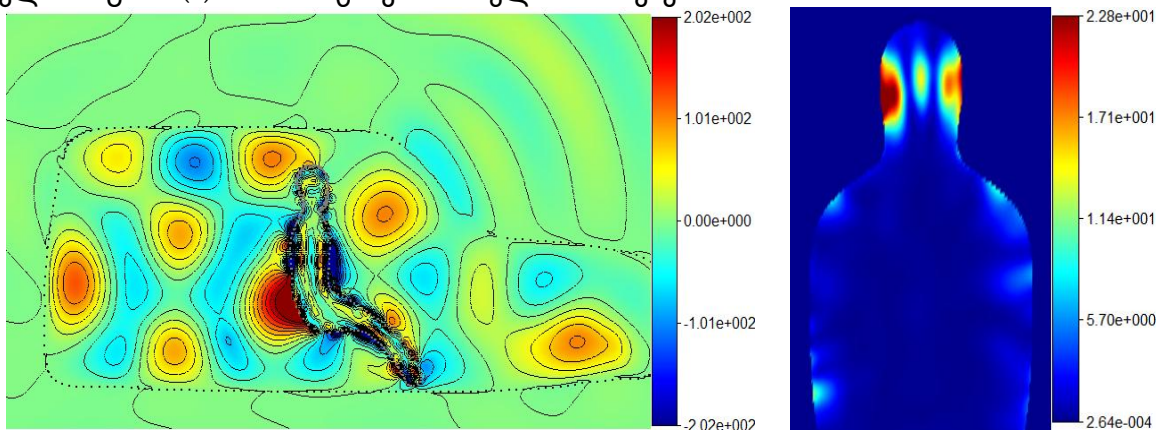
სურ.3.4.1. სიხშირული მახასიათებელი 450მჰც-მახლობლობაში, ნორმირებული შიდა ზედაპირზე ალძრული დენების კვადრატების ჯამის მაქსიმუმზე.



(ა)

(ბ)

სურ.3.4.2. ახლო ველის განაწილება (ა) და წერტილოვანი SAR განაწილება ადამიანის მოდელის შიგნით (ბ) 449.75 მჰც რეზონანსულ სიხშირეზე.

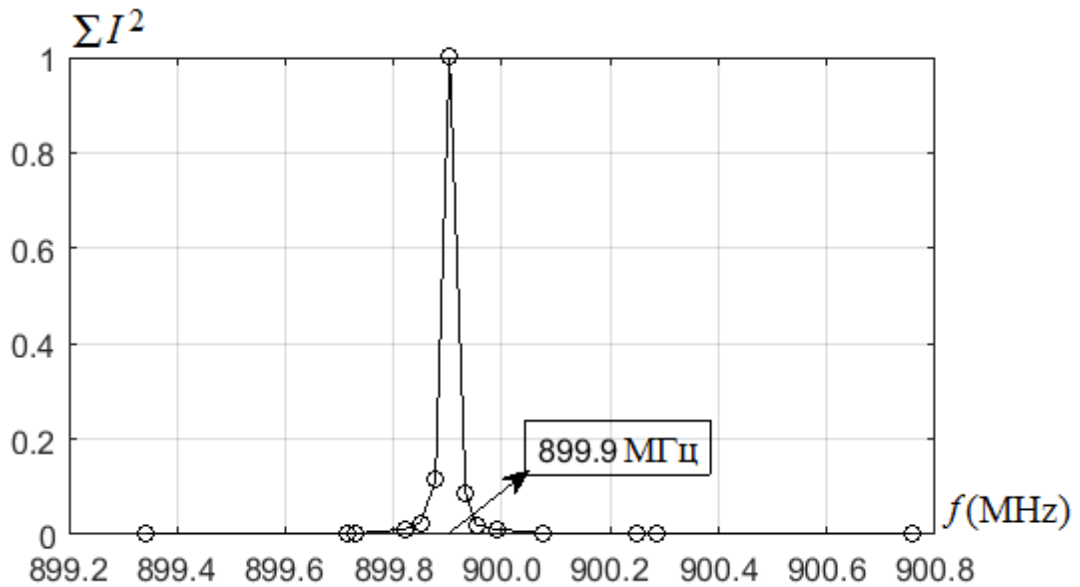


(ა)

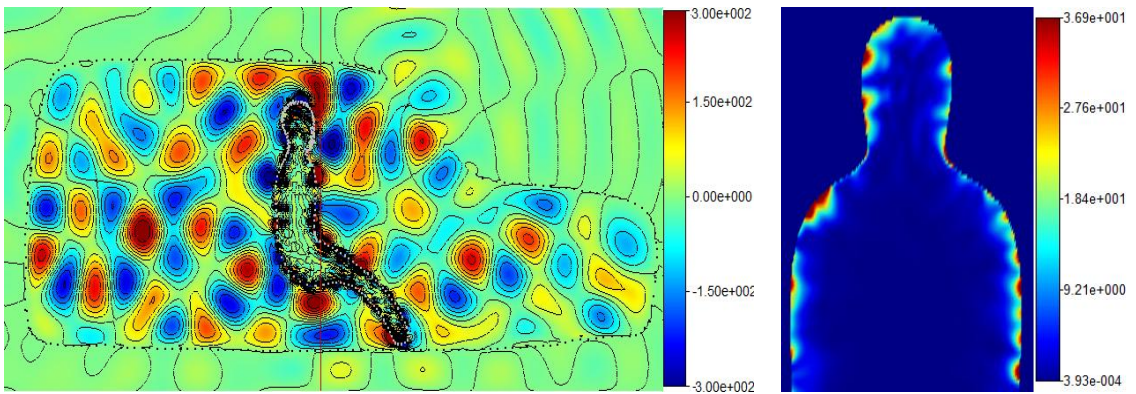
(ბ)

სურ.3.4.3. ახლო ველის განაწილება (ა) და წერტილოვანი SAR განაწილება ადამიანის მოდელის შიგნით 450მჰც (ბ)სიხშირეზე.

900მჰც -ის მახლობლობაში აგებული იქნა სიხშირული მახასიათებელი, რათა გვეპოვნა რეზონანსული სიხშირე. შესაბამისი დამოკიდებულება ნაჩვენებია სურ.3.4.4. -ზე



სურ.3.4.4. სიხშირული მახასიათებელი 900მჰც-მახლობლობაში, ნორმირებული შიდა ზედაპირზე აღძრული დენების კვადრატების ჯამის მაქსიმუმზე.



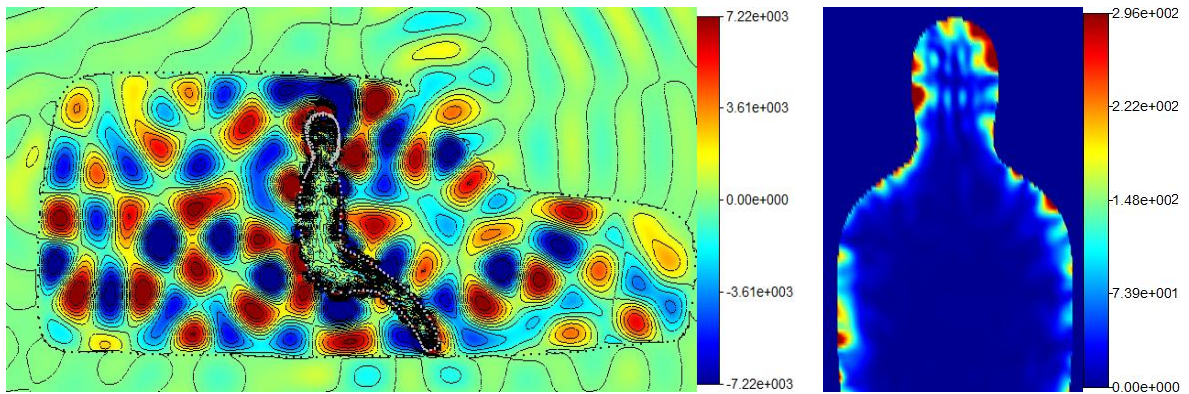
(ა)

(ბ)

სურ.3.4.5. ახლო ველის განაწილება (ა) და წერტილოვანი SAR განაწილება ადამიანის მოდელის შიგნით (ბ) 900მჰც სიხშირეზე.

900მჰც სიხშირეზე წერტილოვანი SAR პიკური მნიშვნელობა არის 36.9 ვატი/კგ. ტალღის სიგრძე ნაკლებია ფანჯრების ზომასთან შედარებით და გამოსხივებული

ენერგია ძირითადად გადის ფანჯრებიდან. მდგარი ტალღა დაიმზირება მანქანის უკანა ნაწილში.



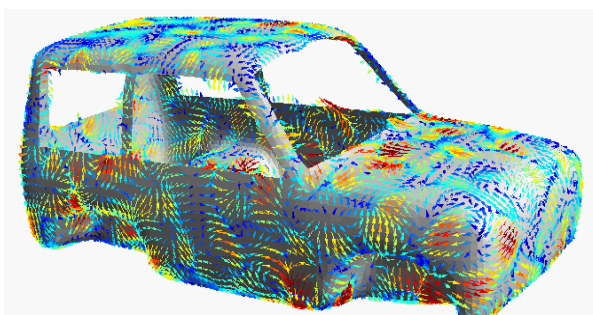
(ა)

(ბ)

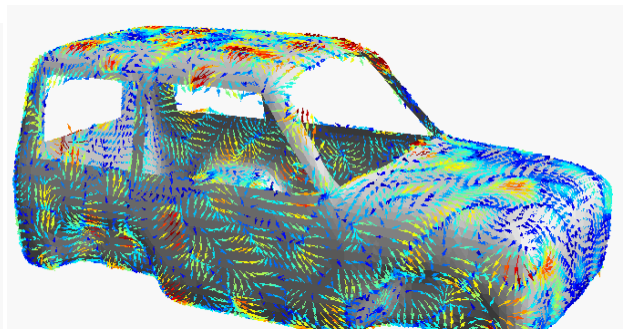
სურ.3.4.6. ახლო ველის განაწილება (ა) და წერტილოვანი SAR განაწილება ადამიანის მოდელის შიგნით (ბ) 899.9 მჰც რეზონანსულ სიხშირეზე.

როგორც ვხედავთ სურ.3.4.4-დან სიხშირე 899.9მჰც წარმოადგენს მოცემული სისტემისთვის რეზონანსულ სიხშირეს. შესწავლილი იქნა ახლო ველის განაწილება და SAR-ის განაწილება მიღებულ რეზონანსულ სიხშირეზე (სურ.3.4.6). რეზონანსული ველის ამპლიტუდა და წერტილოვანი SAR-ის მნიშვნელობა თითქმის ერთი რიგით აღემატება შესაბამის მნიშვნელობებს 900მჰც სიხშირისათვის.

დგმ საშუალებას გვაძლევს, ვიპოვოთ აღძრული დენების განაწილება ჩაკეტილი და ღია ზედაპირების ორივე მხარეს [31]. განხილულ შემთხვევაში ნაპოვნი იქნა აღძრული დენების განაწილება შიდა და გარე ზედაპირზე 899.9მჰც რეზონანსულ სიხშირეზე (სურ.3.4.7). მიღებულმა შედეგებმა აჩვენა, რომ რეზონანსის შემთხვევაში დენების ამპლიტუდებიც ერთი რიგით იზრდება.



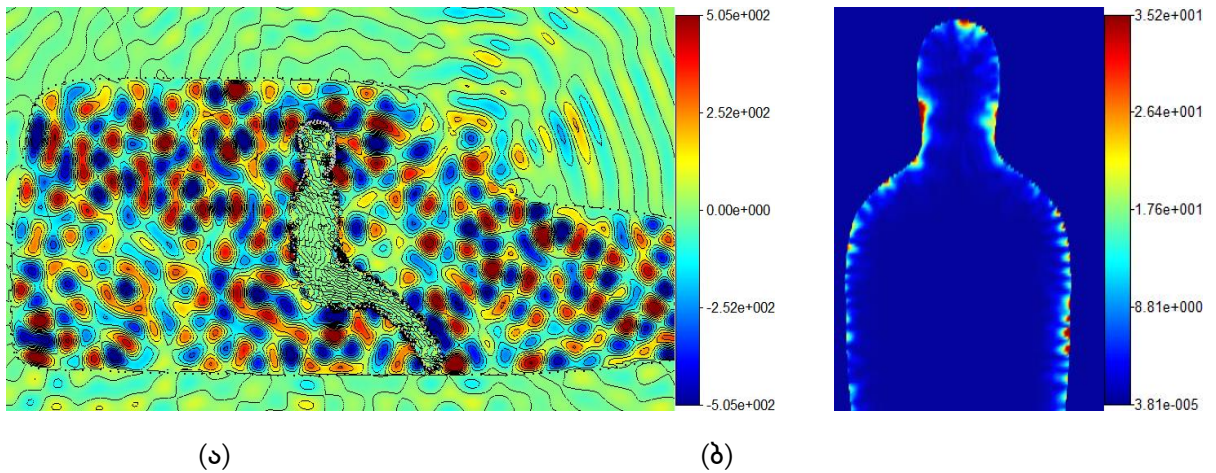
(ა)



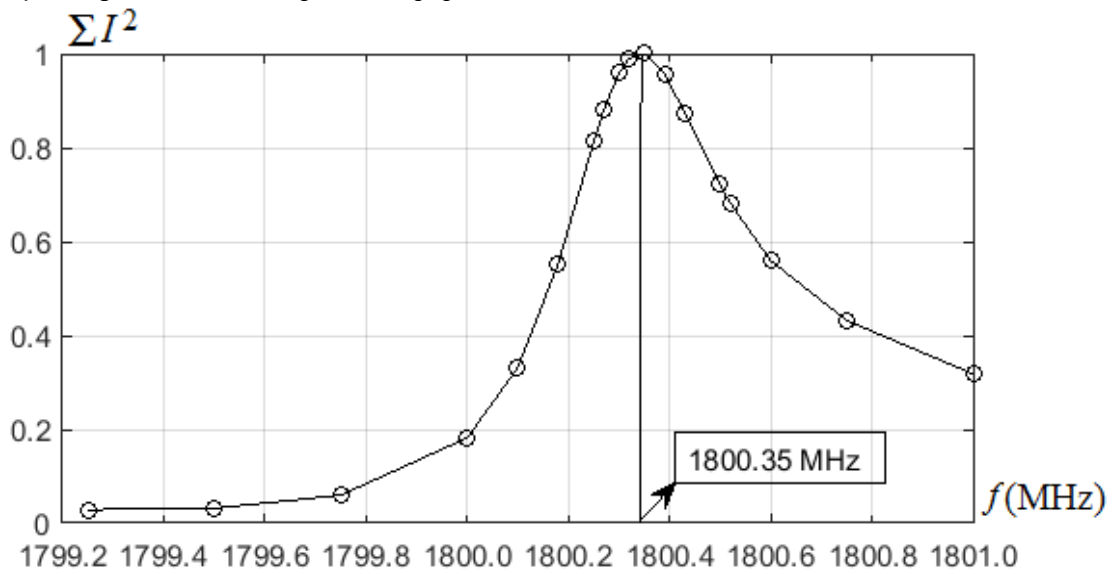
(ბ)

სურ.3.4.7. აღძრული ზედაპირული დენების განაწილება 899.9მჰც რეზონანსულ სიხშირეზე: მანქანის შიდა ზედაპირზე (ა), გარე ზედაპირზე (ბ).

სურ.3.4.8.-ზე წარმოდგენილია ახლო ველის და წერტილოვანი SAR განაწილება 1800მჰც სიხშირისათვის. მიღებულმა შედეგებმა აჩვენა, რომ დიდი დანაკარგების გამო, ველის შეღწევის სიღრმე ადამიანის მოდელის შიგნით ნაკლებია, ვიდრე წინა შემთხვევებში. ძირითადად შთანთქმა ემ ენერჯის ხდება ადამიანის მოდელის ზედაპირზე, კანის ფენებში.



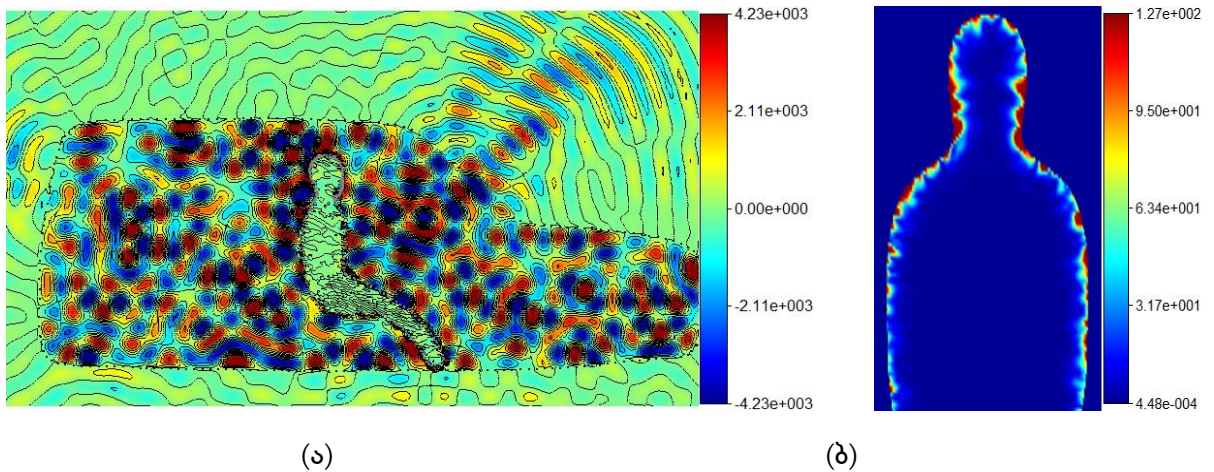
სურ.3.4.8. ახლო ველის განაწილება (ა) და წერტილოვანი SAR განაწილება ადამიანის მოდელის შიგნით (ბ) 1800მჰც სიხშირეზე.



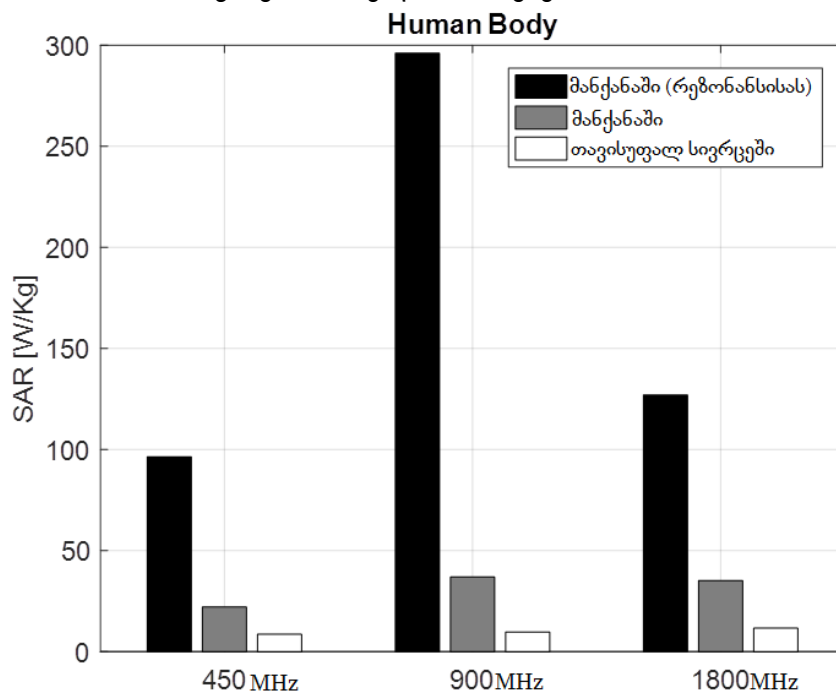
სურ.3.4.9. სიხშირული მახასიათებელი 1800მჰც-მახლობლობაში, ნორმირებული აღძრული დენების კვადრატების ჯამის მაქსიმუმზე.

როგორც ვხედავთ სურ.3.4.9.-დან 1800.35მჰც წარმოადგენს განხილული სისტემის რეზონანსულ სიხშირეს, რომელზეც ემ ველის განაწილება განხილული მოდელების

შიგნით და SAR-ის განაწილებას ადამიანის მოდელის შიგნით ნაჩვენებია სურ.3.4.10.-ზე. როგორც სურ.3.4.10. -დან ჩანს ემ ველის მნიშვნელობა რეზონანსულ სიხშირეზე 8 -ჯერ მეტია, ვიდრე 1800 მჰც-ზე, ხოლო SAR-ს მნიშვნელობა ადამიანის მოდელში 4-ჯერ მეტია.



სურ.3.4.10. ახლო ველის განაწილება (ა) და წერტილოვანი SAR განაწილება ადამიანის მოდელის შიგნით (ბ) 1800.35მჰც რეზონანსულ სიხშირეზე.



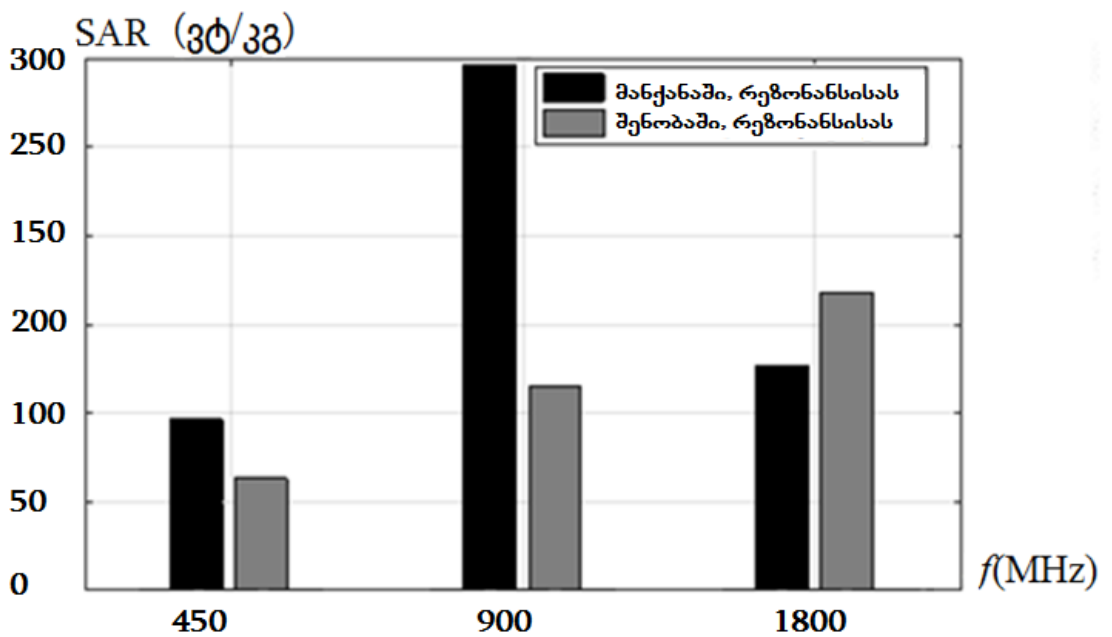
სურ.3.4.11. წერტილოვანი SAR-ის სიდიდეები ადამიანის მოდელისთვის მანქანაში რეზონანსულ და არარეზონანსულ შემთხვევებში და თავისუფალ გარემოში 450, 900, 1800 მჰც სიხშირეების მახლობლად.

სურ.3.4.11. -ზე მოყვანილია მეტალის ზედაპირის, როგორც რეზონატორის უკეთესად წარმოსაჩენად, წერტილოვანი SAR-ის შედარებითი მნიშვნელობები ორი

განსხვავებული დასხივების შემთხვევისათვის. პირველ შემთხვევაში ადამიანი იმყოფება თავისუფალ სივრცეში, ხოლო მეორე შემთხვევაში იმყოფება მანქანის შიგნით და ვითვალისწინებთ დედამინის ამრეკლი ზედაპირის არსებობას. სურ.3.4.11.-ზე მოყვანილია სვეტებიანი დიაგრამა SAR-ის მნიშვნელობები სამივე განხილული სიხშირის სიახლოვეს.

ყველაზე მაღალი სვეტი შეესაბამება შემთხვევას, როცა ადამიანი მანქანის შიგნით სხივდება რეზონანსულ სიხშირეებზე. შუა სვეტები შეესაბამება ანალოგიურ შემთხვევას არარეზონანსულ სიხშირეებზე. ხოლო ყველაზე დაბალი სვეტები შეესაბამება შემთხვევას, როცა ადამიანი იმყოფება ღია სივრცეში. აქედან, ადვილია დავასკვნათ, თუ რა უარყოფითად მოქმედებს ავტომობილის რეზონანსული ზედაპირი მასში მყოფ ადამიანზე.

ზოგიერთი მიღებული შედეგები (მაგალითად, ზუსტი რეზონანსული სიხშირეები) შეიძლება შეიცვალოს ავტომობილის ზომის, ფორმის და სხვა მახასიათებლების მიხედვით, რომლებიც გავლენას ახდენს მისი, როგორც რეზონატორის ხარისხზე. ცხადია, რეზონატორის მაღალი ხარისხისას ველის ამპლიტუდა მანქანის შიგნით და SAR-ის მნიშვნელობა ადამიანის სხეულში უფრო გაიზრდება.



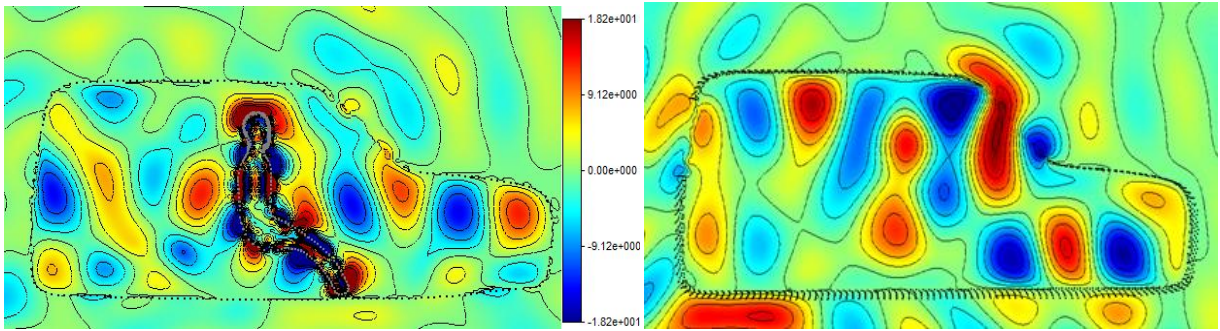
სურ.3.4.12. წერტილოვანი SAR- ის შედარებითი მნიშვნელობები განხილული სიხშირეების მახლობლად, როდესაც ადამიანი იმყოფება მანქანაში და შენობაში.

SAR -ის მნიშვნელობების შედარებითა ანალიზმა (ადამიანი იმყოფება მანქანაში და შენობაში, სურ.3.4.12) აჩვენა, რომ 450 და 900 [მჰც] სიხშირეებზე SAR -ის მნიშვნელობა მანქანის შემთხვევაში უფრო მაღალია. რაც შეიძლება იმით ავსნათ, რომ მანქანის ზედაპირი ნაკლებ გამჭვირვალეა ვიდრე შენობის კედლები (მოცემულ შემთხვევაში შენობის კედლების გამჭვირვალეობა არის 0.22), ტალღის სიგრძე კი ფანჯრის ზომას შეესაბამება. შედეგად, რეზონანსული ველის ამპლიტუდა და შესაბამისად, SAR -ის მნიშვნელობა ადამიანის თავში მანქანაში მდებარეობისას არის დიდი. 1800 მჰც სიხშირეზე SAR-ის პიკური მნიშვნელობა არის მცირე. რადგან ფანჯარა ამ სიხშირეზე მეტად გამჭვირვალეა (ტალღის სიგრძე მცირეა მის ზომასთან შედარებით).

§3.4.2. საბაზო სადგურის გამოსხივების ემ ველის ზეგავლენის შესწავლა ადამიანის მოდელზე მანქანაში

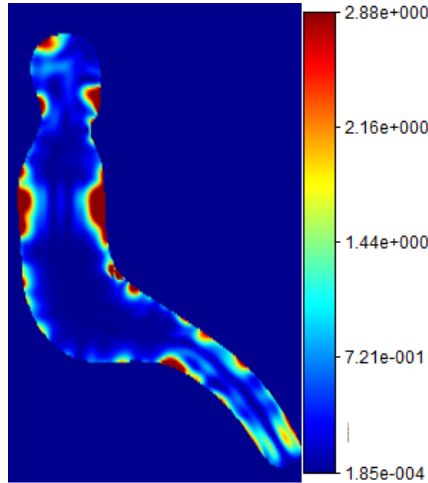
შევისწავლეთ შემთხვევა, როდესაც ემ ველის წყაროს წარმოადგენს გარე 80ვტ სიმძლავრის საბაზო სადგურის ანტენა, რომელიც მდებარეობს ზემოხსენებულ სიმაღლეზე ავტომანქანიდან. ისევე როგორც წინა შემთხვევაში, შევისწავლეთ ახლო ველის და წერტილოვანი SAR -ის განაწილება ადამიანის მოდელის შიგნით 450, 900 და 1800 [მჰც] სიხშირეებზე.

სურ.3.4.13.-ზე მოყვანილია ახლო ველის განაწილება (კვეთაში) 450მჰც-სიხშირეზე, ადამიანის მოდელის გათვალისწინებით მის შიგნით და გარეშე. კვლევამ აჩვენა, რომ დაცემული ველი (ტალღის სიგრძე ფანჯრის რივისაა) აღწევს მანქანის შიგნით ფანჯრებიდან და მდგრადი ტალღა ფორმირდება ძირითადად მანქანის წინა ნაწილში. წერტილოვანი SAR-ის მაქსიმალური მნიშვნელობაა 2,88 ვტ/კგ (სურ.3.4.13.).



(ა)

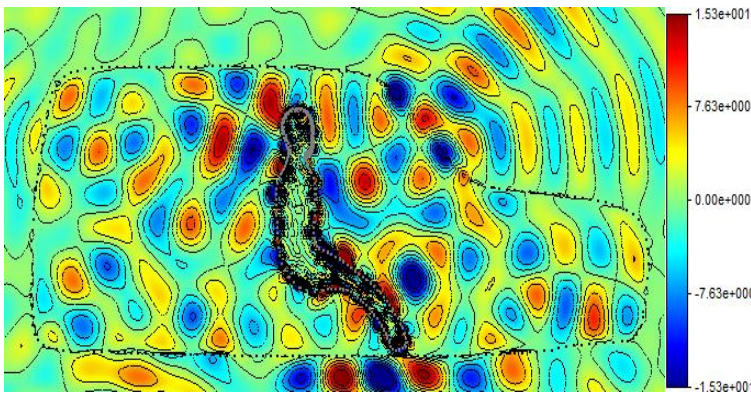
(ბ)



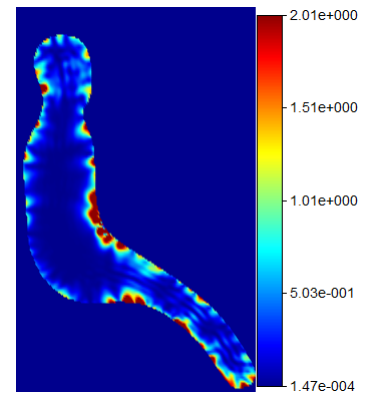
(გ)

სურ.3.4.13. ახლო ველის განაწილება 450მჰც სიხშირეზე: (ა) ადამიანის მოდელის გათვალისწინებით, (ბ) ადამიანის მოდელის გათვალისწინების გარეშე, (გ) წერტილოვანი SAR-ის განაწილება ადამიანის შიგნით.

წერტილოვანი SAR-ის და ახლო ველის განაწილება შესწავლილი იქნა ასევე 900მჰც-სიხშირეზე (სურ.3.4.14). აღმოჩნდა, რომ შიდა ველის ენერგიის დიდი ნაწილი გადის თანჯრიდან (სურ.3.4.14ა); რის შედეგადაც წერტილოვანი SAR იღებს მცირე მნიშვნელობას ვიდრე 450 მჰც-სიხშირეზე (სურ.3.4.14ბ).



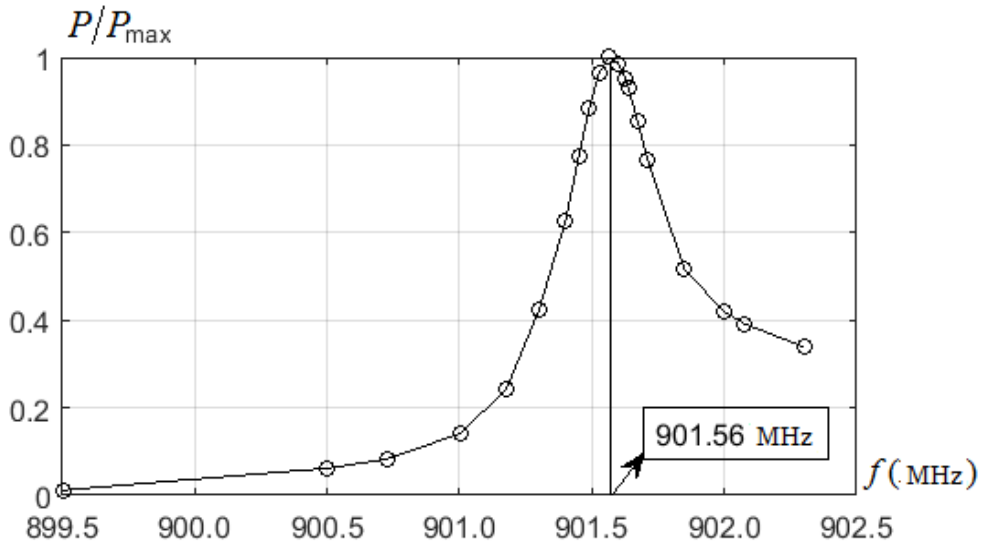
(ა)



(ბ)

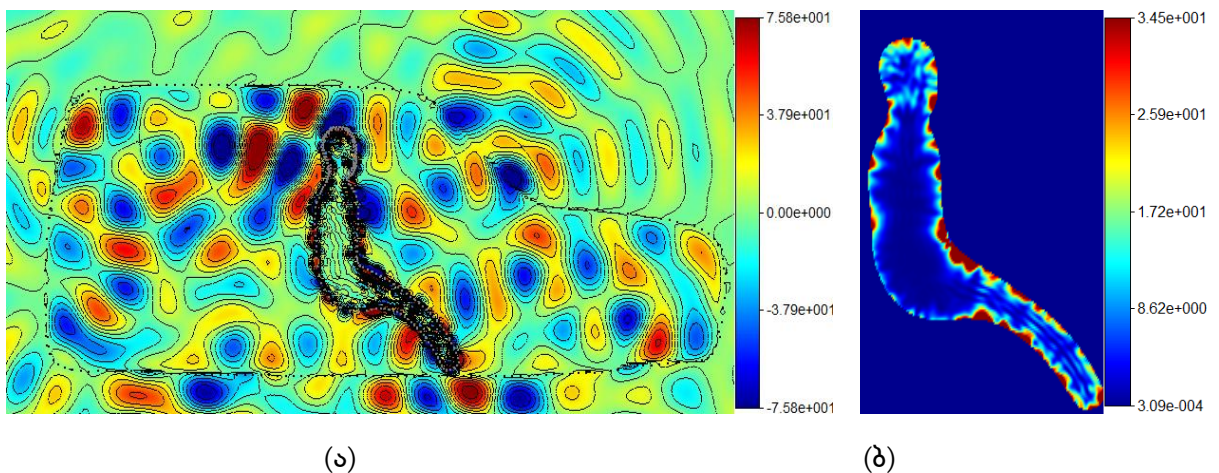
სურ.3.4.14. ახლო ველის განაწილება (ა) და წერტილოვანი SAR განაწილება ადამიანის მოდელის შიგნით (ბ) 900მჰც სიხშირეზე.

შესწავლილ იქნა ასევე 900 მჰც-სიხშირის მახლობლობაში სიხშირული მახასიათებელი (სურ.3.4.15.). სისტემის რეზონანსი დაიმზირება 901.56 მჰც-სიხშირეზე.



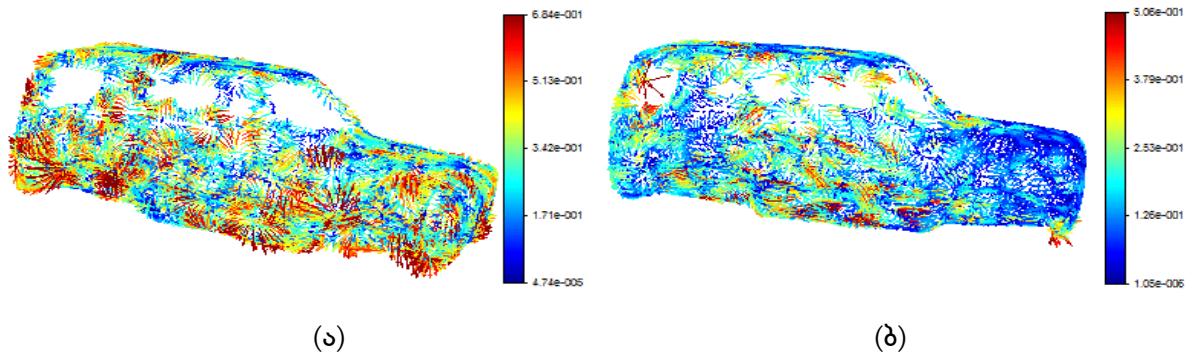
სურ.3.4.15. სიხშირული მახასიათებელი, ნორმირებული გადასხივებული სიმძლავრის მაქსიმუმზე, 900მჰც-მახლობლობაში, როდესაც წყარო მდებარეობს გარეთ.

სურ.3.4.16.-ზე ნაჩვენებია ახლო ველის და წერტილოვანი SAR-ის განაწილება ნაპოვნ რეზონანსულ სიხშირეზე. მიღებულმა შედეგებმა აჩვენა, რომ წერტილოვანი SAR-ის მნიშვნელობა თითქმის ერთი რიგით მეტია ვიდრე 900მჰც-სიხშირეზე.



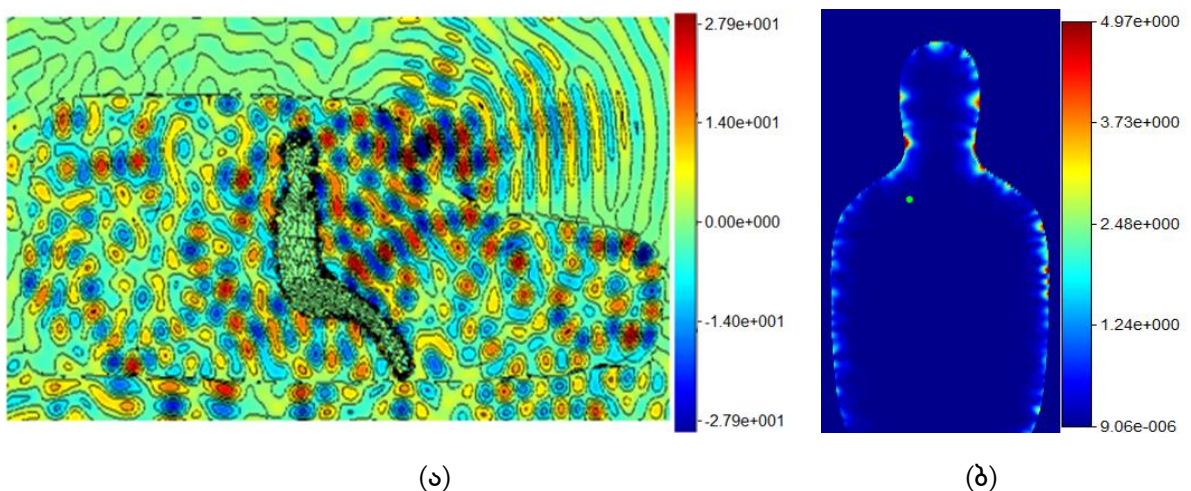
სურ.3.4.16. ახლო ველის განაწილება (ა) და წერტილოვანი SAR განაწილება ადამიანის მოდელის შიგნით (ბ) 901.56 მჰც რეზონანსულ სიხშირეზე.

რეზონანსული დენების განაწილება შიდა და გარე ზედაპირებზე მოყვანილია სურ.3.4.17. შიდა ზედაპირზე დენებს გააჩნიათ უფრო დიდი ამპლიტუდა ვიდრე გარე ზედაპირზე.



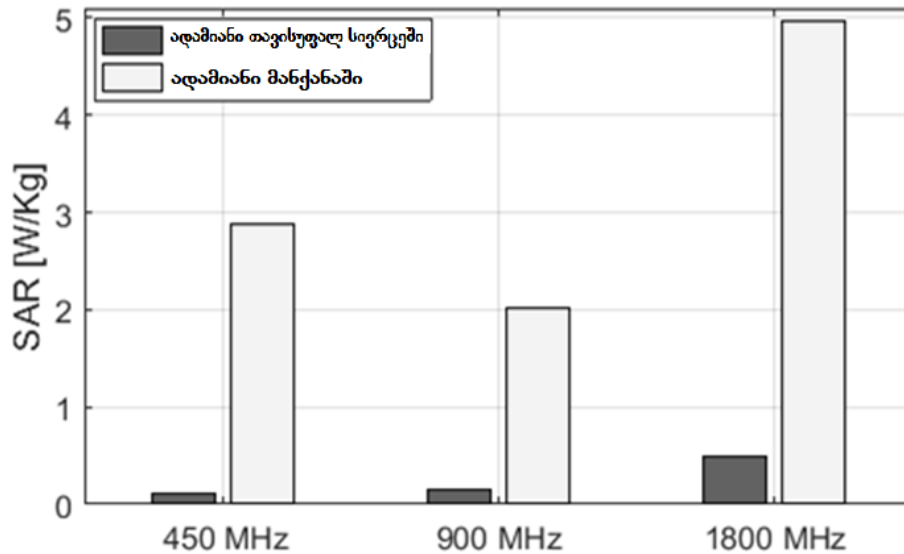
სურ.3.4.17. ალძრული ზედაპირული დენების განაწილება 901.56მჰც რეზონანსულ სიხშირეზე: მანქანის შიდა ზედაპირზე (ა), გარე ზედაპირზე (ბ).

1800მჰც- სიხშირისათვის ახლო ველის და წერტილოვანი SAR-ს განაწილება ნაჩვენებია სურ.3.4.18. დიდი დანაკარგების გამო, აღნიშნულ სიხშირეზე, ველის შეღწევის სიღრმე ადამიანის მოდელის შიგნით არის გაცილებით ნაკლები ვიდრე დაბალ სიხშირეებზე. შედეგად, ემ ველის ენერჯის შთანთქმა ძირითადად ხდება ადამიანის მოდელის კანის ფენების მიერ. შიდა ენერჯის დიდი ნაწილი გადის ფანჯრებიდან.



სურ.3.4.18. ახლო ველის განაწილება (ა) და წერტილოვანი SAR განაწილება ადამიანის მოდელის შიგნით (ბ) 1800 მჰც სიხშირეზე.

შედარებული იქნა წერტილოვანი SAR-ის მნიშვნელობები ორი სხვადასხვა შემთხვევისათვის: 1) ადამიანი იმყოფება თავისუფალ სივრცეში და 2) იმყოფება მანქანის შიგნით (სურ.3.4.19.).

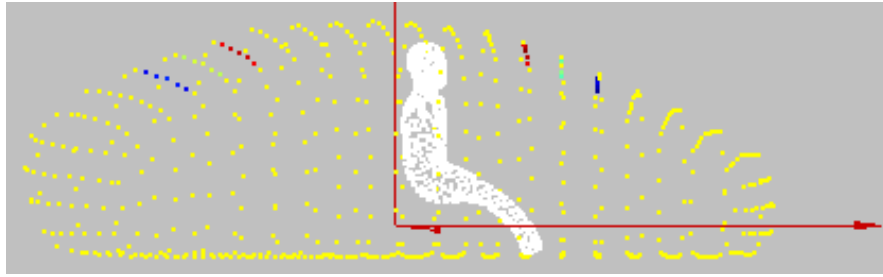


სურ.3.4.19. წერტილოვანი SAR- ის შედარებითი მნიშვნელობები, როდესაც ადამიანი იმყოფება თავისუფალ სივრცეში და მანქანის შიგნით

მიღებულმა შედეგებმა აჩვენა, რომ საბაზო სადგური ანტენის მიერ გამოსხივებული ემ ველით დასხივებისას, წერტილოვანი SAR-ის მნიშვნელობა საშუალოდ 4-ჯერ დიდია, როდესაც ადამიანი იმყოფება მანქანის შიგნით.

§3.5.დამხმარე გამომსხივებლების მეთოდის გამოყენება ადამიანზე ემ ზეგავლენის შესასწავლად მანქანაში დედამიწის ზედაპირის გათვალისწინების გარეშე

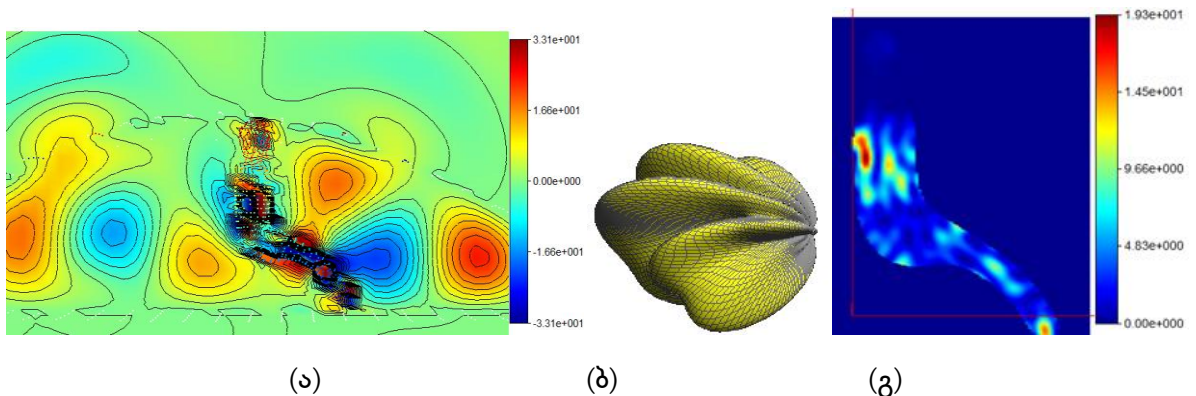
ზემოთ აღწერილი კვლევის მსგავსად, შევისწავლეთ შემთხვევა, როდესაც ადამიანი იმყოფება შედარებით მცირე ზომის მანქანაში და არ ვითვალისწინებთ დედამიწის ზედაპირის გავლენას მანქანის შიგნით ველის ფორმირების პროცესში (სურ.3.5.1).



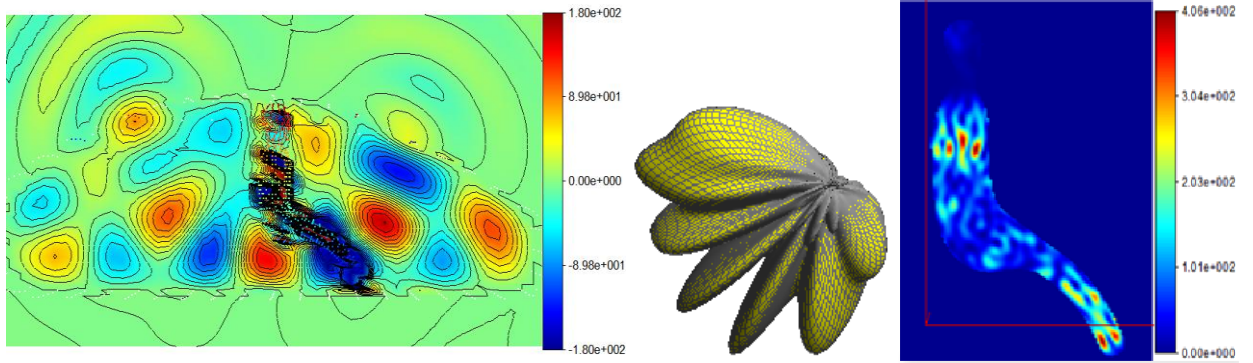
სურ.3.5.1. დგმ გამოყენება

ემ ველის ზეგავლენის გამოსაკვლევად ადამიანზე მანქანის შიგნით, გამოყენებულ იქნა დამხმარე გამომსხივებლების მეთოდი.

მომზადდა ადამიანის გასაშუალოებული ერთგვაროვანი მოდელი (გააჩნია დიელექტრიკული შეღწევადობის და გამტარებლობის გასაშუალოებული მნიშვნელობები) და განხილული იქნა შემთხვევა, როდესაც ასხივებს მობილური ტელეფონის ანტენა (მანქანის შიგნით) და საბაზო სადგურის ანტენა (გარე წყარო). რიცხვითი ექსპერიმენტი განხორციელდა დგმ დაფუძნებული პროგრამული პაკეტის გამოყენებით 300მჰც და 450მჰც სიხშირეებისათვის. კვლევის შედეგები წარმოდგენილია სურ.3.5.2-5-ზე.

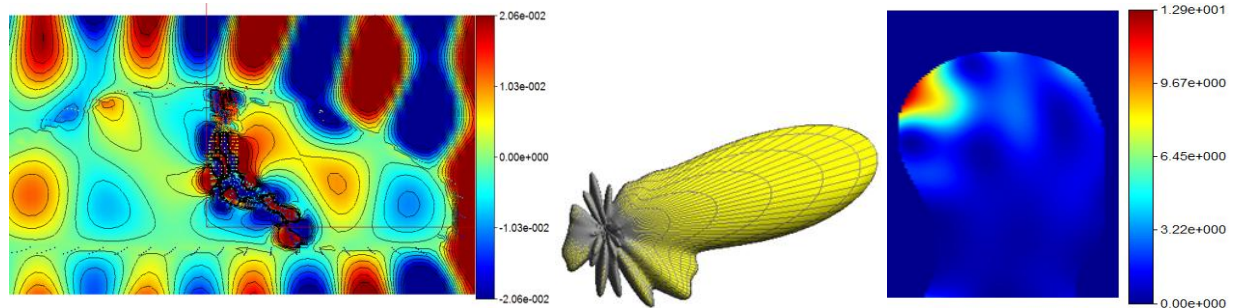


სურ.3.5.2. ახლო ველის განაწილება მანქანაში (ა), შორი ველის დიაგრამა (ბ) და SAR განაწილება ადამიანის მოდელის შიგნით (გ) 300მჰც სიხშირეზე (წყარო მდებარეობს მანქანის შიგნით)



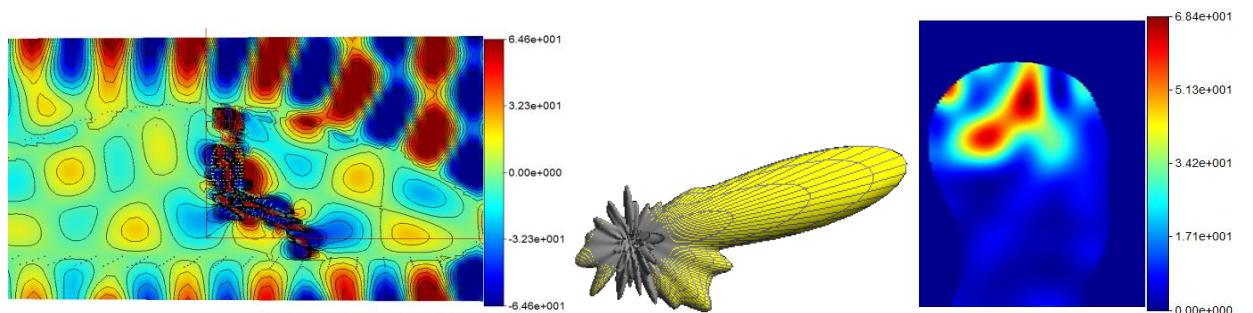
(ა) (ბ) (გ)

სურ.3.5.3. ახლო ველის განაწილება მანქანაში (ა), შორი ველის დიაგრამა (ბ) და SAR განაწილება ადამიანის მოდელის შიგნით (გ) 450მჰჰ სიხშირეზე (წყარო მდებარეობს მანქანის შიგნით)



(ა) (ბ) (გ)

სურ.3.5.4. ახლო ველის განაწილება მანქანაში (ა), შორი ველის დიაგრამა (ბ) და SAR განაწილება ადამიანის მოდელის შიგნით (გ) 300მჰჰ სიხშირეზე (ემ წყაროს წარმოადგენს საბაზო სადგურის ანტენა)



(ა) (ბ) (გ)

სურ.3.5.5. ახლო ველის განაწილება მანქანაში (ა), შორი ველის დიაგრამა (ბ) და SAR განაწილება ადამიანის მოდელის შიგნით (გ) 450მჰჰ სიხშირეზე (ემ წყაროს წარმოადგენს საბაზო სადგურის ანტენა)

როგორც მიღებული შედეგებიდან ჩანს, ორივე განხილულ შემთხვევაში და განხილული სიხშირეებისათვის, მანქანის შიგნით ფორმირდება მაღალი რეაქტიული ველი. გამოსხივებული ემ ველის ენერჯის ნაწილი გადასხივდება გარემოში, ნაწილი

კი შთაინთქმება ადამიანის ორგანიზმის მიერ. განხილულ სიხშირეებზე (300, 450მჰც) ემ ველის ენერჯის შთაინთქმა დიდია და შედეგად ვიღებთ წერტილოვანი SAR-ის მაღალ მნიშვნელობას ადამიანის თავში, რაც კარგად ჩანს წარმოდგენილი შედეგებიდან [70].

§3.6. III თავის დასკვნა

წარმოდგენილ იქნა დგმ-ის გამოყენებით ჩატარებული კვლევის შედეგები ადამიანზე ემ გამოსხივების ზემოქმედების შესასწავლად უსადენო კავშირის სტანდარტულ სიხშირეებზე. კომპიუტერული მოდელირების საფუძველზე შევისწავლეთ ემ ველების განაწილება მანქანაში ადამიანის მოდელის და გამომსხივებლის არსებობისას, SAR-ის განაწილება ადამიანის მოდელში, ასევე გამოსხივების დიაგრამა ფანჯრის ღია ნაწილების გათვალისწინებით.

შესწავლილი იქნა შემთხვევები, როდესაც გამომსხივებელ წყაროს წარმოადგენს მობილური ტელეფონის ანტენა (შიდა წყარო) და როდესაც ემ ველის წყაროს წარმოადგენს საბაზო სადგური ანტენა (გარე წყარო).

რიცხვითი ექსპერიმენტისას გათვალისწინებული იქნა დედამიწის ზედაპირის გავლენა მანქანის შიგნით ველის ფორმირების პროცესში. ზოგიერთი შემთხვევებისათვის, მიღებულმა შედეგებმა აჩვენა ავტომობილის შიგნით მაღალი ამპლიტუდის რეაქტიული ველის არსებობა, რაც იწვევს SAR პიკური მნიშვნელობის ზრდას ადამიანის თავის ქსოვილებში.

კვლევამ აჩვენა, რომ ემ ველის წყაროს ადამიანის თავთან მდებარეობისას, განხილულ სტანდარტულ სიხშირეებზე, ადამიანის ქსოვილებში წერტილოვანი SAR-ის მნიშვნელობები, ადამიანის მანქანაში ყოფნისას თითქმის 3-4-ჯერ დიდია, ვიდრე ღია სივრცეში მისი მდებარეობისას; ხოლო რეზონანსულ სიხშირეებზე SAR კიდევ უფრო იზრდება. კერძოდ, მანქანაში, 450 მჰც-ის მახლობლად რეზონანსულ სიხშირეზე ადამიანის მიერ შთაინთქმული ველის ენერჯია (SAR) 5-ჯერ მეტია, ვიდრე არარეზონანსულ სიხშირეებზე, 900 მჰც-ის მახლობლად თითქმის ერთი რიგით, ხოლო 1800 მჰც-ის მახლობლად კი-4-ჯერ.

შედარებითმა ანალიზმა აჩვენა, რომ როდესაც ემ ველის წყაროს წარმოადგენს საბაზო სადგურის ანტენა და ადამიანი იმყოფება მანქანაში, წერტილოვანი SAR-ის მნიშვნელობები ერთი რიგით დიდია წერტილოვანი SAR-ის მნიშვნელობებზე მიღებულს ადამიანის ყოფნისას ღია სივრცეში.

წარმოდგენილი შედეგები ადასტურებს, რომ მანქანის გამტარი ზედაპირი ზოგიერთ სიხშირეზე მოქმედებს როგორც რეზონატორი აგროვებს და აძლიერებს ემ წყაროს მიერ გამოსხივებულ ემ ველს; რამაც შეიძლება უარყოფითად იმოქმედოს მასში მყოფ ადამიანზე. აღნიშნულიდან გამომდინარე, მწარმოებლებმა ავტომობილის წარმოების პროცესში უნდა გაითვალისწინონ ეს მნიშვნელოვანი ფაქტორი და მანქანის შიდა ზედაპირი დაუარონ მშთანთქმელი ფენით, რაც მნიშვნელოვნად შეამცირებს ემ ველის გაზრდას მანქანაში.

დისერტაციის ძირითადი შედეგები გამოტანილი დასაცავად

წარმოდგენილი ნაშრომის ფარგლებში მიღებული შედეგები, მეტად მნიშვნელოვანია ადამიანზე ემ დასხივების ზეგავლენის შესწავლის მიმართულებით.

კვლევიტ, რომელიც ჩატარდა ზრდასრული ადამიანის და ბავშვის არაერთგვაროვან მოდელზე FDTD მეთოდით, მიღებულ იქნა შემდეგი ძირითადი შედეგები:

- ✓ კვლევიტ დადგინდა, რომ ყველა განხილული შემთხვევისათვის და სიხშირისათვის, როგორც ზრდასრული ადამიანის ასევე ბავშვის თავის მოდელისათვის, 10გ SAR-ის პიკური მნიშვნელობები საშუალოდ ორჯერ დიდია, როდესაც არ ვითვალისწინებთ ხელის გავლენას, ხელის გათვალისწინებით მიღებულ მის მნიშვნელობებთან შედარებით (ასევე 2-ჯერ აღემატება ზღვრულ დასაშვებ მნიშვნელობას);
- ✓ განხილული მოდელისათვის ტემპერატურის მატების მნიშვნელობებს შორის განსხვავება შეადგენს საშუალოდ 10-40%-ს. ტემპერატურის მატების მნიშვნელობები ზრდასრული ადამიანისათვის რიგ შემთხვევაში დაახლოებით 40%-ით აღემატება ზღვრულ დასაშვებ მნიშვნელობას; ბავშვის მოდელის

შემთხვევაში კი ეს მნიშვნელობები უმეტესად ნორმის ფარგლებშია; რაც აიხსნება იმით, რომ განხილული მობილური ტელეფონის მოდელისათვის, ანტენა მდებარეობს ტელეფონის ქვედა ნაწილში და დაცილებულია ბავშვის თავის მოდელიდან უფრო დიდი მანძილით, ვიდრე ზრდასრული ადამიანის თავის მოდელის შემთხვევაში.

- ✓ ჩატარებულმა კვლევამ აჩვენა, რომ ტელეფონის ანტენის შეთანხმება თავისუფალ სივრცესთან მნიშვნელოვანი ასპექტია ემ დასხივების შესწავლისას.
- ✓ ყველაზე ცუდი შეთანხმება დაიმზირება, როდესაც მობილური ტელეფონის ანტენა დაფარულია ხელის გულით (Hand 2) და მანძილი ადამიანის თავსა და მობილურ ტელეფონს (ხელთან ერთად) შორის არის 20მმ 1900 მჰც-ის შემთხვევაში, ხოლო 1მმ 900 მჰც-ის შემთხვევაში; S11 კოეფიციენტის (რომელიც აღწერს ანტენის თავისუფალ სივრცესთან შეთანხმებას) ამპლიტუდური მნიშვნელობა 900მჰც სიხშირისათვის არის 0.7, რაც 2.5-ჯერ დიდია მის მნიშვნელობაზე მხოლოდ ანტენისათვის (როცა განხილულ ანტენას აქვს კარგი შეთანხმება თავისუფალ სივრცესთან); ხოლო 1900მჰც-ის შემთხვევაში კი- S11 კოეფიციენტის ამპლიტუდური მნიშვნელობა დაახლოებით 4-ჯერ აღემატება მის მნიშვნელობას, როდესაც განხილულ ანტენას აქვს საუკეთესო შეთანხმება. მიღებული ნიშნავს, რომ ხელის პოზიცია, რომლითაც დაჭერილია მობილური ტელეფონი (ასევე დაცილების მანძილი), მნიშვნელოვნად მოქმედებს გამოსხივების პროცესზე.
- ✓ კვლევამ აჩვენა, რომ ანტენის სიახლოვეს მყოფი დიელექტრიკული ობიექტი მნიშვნელოვან გეგავლენას ახდენს მის შეთანხმებაზე თავისუფალ სივრცესთან. ზოგიერთ შემთხვევაში ხელი, ან თითების სხვადასხვა პოზიცია, ამცირებს S11 კოეფიციენტს (გვაქვს კარგი შეთანხმება მცირედით წანაცვლებულ სიხშირეებზე, როცა არ ვითვალისწინებთ ადამიანის თავის გავლენას).
- ✓ ემ ველის მნიშვნელობები ანტენის ახლო ზონაში და შესაბამისად SAR-ის პიკური მნიშვნელობა ძლიერად დამოკიდებულია S11 პარამეტრსა (შეთანხმება) და

„თავი-ანტენა-ხელი“ სისტემის კონფიგურაციაზე. S11 პარამეტრის მნიშვნელობის ზრდისას, ორივე განხილული სიხშირისათვის, იზრდება SAR-ის მნიშვნელობები ადამიანის თავში. კერძოდ, როდესაც ტელეფონი დაჭერილია ისე, რომ ხელის გული ფარავს ანტენას (1მმ დაცილებისას) S11 პარამეტრის მნიშვნელობა არის მაქსიმალური (ანტენის ყველაზე ცუდი შეთანხმება თავისუფალ სივრცესთან) SAR-ის პიკური მნიშვნელობა თავში თითქმის 4-ჯერ დიდია, SAR-ის იმ პიკურ მნიშვნელობებზე, როდესაც განხილულ ანტენას აქვს საუკეთესო შეთანხმება, ორივე განხილული სიხშირისათვის. 900 მჰც სიხშირისათვის SAR-ის პიკური მნიშვნელობა ადამიანის თავის მოდელის ქსოვილებში 4-ჯერ, ხოლო 1900მჰც სიხშირეზე კი 8-ჯერ აღემატება ზღვრულ დასაშვებ მნიშვნელობას. რაც არის შედეგი იმისა, რომ თანამედროვე ტელეფონები ავტომატურად ზრდიან გამოსხივების სიმძლავრეს კარგი კავშირის მისაღწევად, რაც იწვევს ტელეფონის გარშემო არასასურველი რეაქტიული ველის ფორმირებას; რაც თავისმხრივ იწვევს SAR-ის პიკური მნიშვნელობების გაზრდას ადამიანის თავის მოდელის ქსოვილებში.

დამხმარე გამომსხივებლების მეთოდით ადამიანზე ემ დასხივების ზემოქმედების კვლევით მიღებული იქნა:

- ✓ შემოტანილ იქნა დამხმარე გამომსხივებლების მეთოდზე (დგმ) დაფუძნებული ახალი მიდგომა მანქანაში მყოფ ადამიანზე ემ დასხივების ზემოქმედების გამოსაკვლევად და მანქანის ქვეშ დედამიწის ზედაპირის დასამოდელირებლად სარკული გამოსახულების მეთოდზე დაყრდნობით. შეიქმნა აღნიშნულ მეთოდოლოგიაზე დაფუძნებული პროგრამული პაკეტი.
- ✓ შესწავლილ იქნა მანქანის რეზონანსული თვისებები და ნაპოვნი იქნა რეზონანსული სიხშირეები. მიღებულმა შედეგებმა აჩვენა, რომ საკომუნიკაციო სიხშირეთა დიაპაზონში მანქანის მეტალური ზედაპირის შიგნით ადგილი აქვს რეზონანსულ მოვლენებს; მანქანის ზედაპირი მოქმედებს როგორც

რეზონატორი და აძლიერებს მობილური ტელეფონის მიერ გამოსხივებული ემ ველს. რეზონანსულ სიხშირეებზე ველის ამპლიტუდა მანქანაში საშუალოდ ერთი რიგით იზრდება, რაც იწვევს SAR-ის ზრდას დაახლოებით 4-5-ჯერ ადამიანის ქსოვილებში.

- ✓ ემ ველის წყაროს ადამიანის თავთან მდებარეობისას, განხილულ სტანდარტულ სიხშირეებზე, ადამიანის ქსოვილებში წერტილოვანი SAR-ის მნიშვნელობები, ადამიანის მანქანაში ყოფნისას, თითქმის 3-4-ჯერ დიდია, ვიდრე ღია სივრცეში მისი მდებარეობისას; ხოლო რეზონანსულ სიხშირეებზე SAR კიდევ უფრო იზრდება. კერძოდ, მანქანაში, 450 მჰც-ის მახლობლად რეზონანსულ სიხშირეზე ადამიანის მიერ შთანთქმული ველის ენერჯია (SAR) 5-ჯერ მეტია, ვიდრე არარეზონანსულ სიხშირეებზე, 900 მჰც-ის მახლობლად თითქმის ერთი რიგით, ხოლო 1800 მჰც-ის მახლობლად კი 4-ჯერ.
- ✓ შედარებითმა ანალიზმა აჩვენა, რომ როდესაც ემ ველის წყაროს წარმოადგენს საბაზო სადგურის ანტენა და ადამიანი იმყოფება მანქანაში, წერტილოვანი SAR-ის მნიშვნელობები ერთი რიგით დიდია წერტილოვანი SAR-ის მნიშვნელობებზე ადამიანის ყოფნისას ღია სივრცეში.
- ✓ შედარებითმა ანალიზმა ასევე აჩვენა, რომ რეზონანსისას წერტილოვანი SAR-ის მნიშვნელობები, მანქანაში ადამიანის მდებარეობისას, 2-3-ჯერ აღემატება მის მნიშვნელობებს როდესაც ადამიანი კომუნიკაციისას იმყოფება შენობაში. რაც შეიძლება იმით ავსხნათ, რომ მანქანის ზედაპირი ნაკლებ გამჭვირვალეა ვიდრე შენობის კედლები (მოცემულ შემთხვევაში შენობის კედლების გამჭვირვალობა არის 0.22), ტალღის სიგრძე კი ფანჯრის ზომას შეესაბამება. შედეგად, რეზონანსული ველის ამპლიტუდა და შესაბამისად, SAR -ის მნიშვნელობა მანქანაში არის დიდი. 1800 მჰც სიხშირეზე SAR-ის მნიშვნელობა მანქანის შიგნით არის მცირე. რადგან ფანჯარა ამ სიხშირეზე მეტად გამჭვირვალეა (ტალღის სიგრძე მცირეა მის ზომასთან შედარებით).

რეკომენდაციები მობილური კაუჭით გამოწვეული საფრთხეების თავიდან ასაცილებლად

მიღებული შედეგების შეჯამების საფუძველზე განმტკიცებულ იქნა ზოგადი რეკომენდაციები მობილური ტელეფონის გამოსხივების მავნე ზეგავლენის თავიდან ასარიდებლად. ასევე, ნაჩვენები იქნა, რომ არსებული საერთაშორისო უსაფრთხოების სტანდარტები (SAR-ის დასაშვები ზღვრული მნიშვნელობები) საჭიროებს გადახედვას.

- ✓ მომხმარებელმა ტელეფონის დაჭერისას არ უნდა დაფაროს ხელის გულით ტელეფონის ანტენა, რომელიც თანამედროვე მობილურ ტელეფონებში მოთავსებულია ქვედა მხარეს. სასურველია ტელეფონი დავიჭიროთ მხოლოდ თითებით. სასურველია მწარმოებლებმა მობილური ტელეფონის დიზაინის პროცესში გაითვალისწინონ აღნიშნული პრობლემა და მობილური ტელეფონის „ქეისზე“ მონიშნონ ის ადგილები, სადაც თითებით შეხება კომუნიკაციის დროს დიდ გავლენას არ მოახდენს ტელეფონის ანტენის გამოსხივებაზე.
- ✓ მნიშვნელოვანია ბავშვებში მაქსიმალურად შევზღუდოთ მობილური ტელეფონის გამოყენება; რადგან მათი სხეულის მცირე ზომების და ფიზიკური თვისებების გამო ემ ველის ენერჯის შთანთქმა უფრო მაღალია ზრდასრულ ადამიანთან შედარებით.
- ✓ არასასურველია მობილური ტელეფონების გამოყენება ავტომობილში, და ასევე სხვა მეტალური კონსტრუქციით შემოსაზღვრულ სივრცეში; რადგან მობილური დიაპაზონის სიხშირეებზე ავტომობილის მეტალური ზედაპირი მოქმედებს როგორც რეზონატორი და აძლიერებს ტელეფონის ანტენის მიერ გამოსხივებულ ველს, რომლის ზემოქმედებამაც შეიძლება მკვეთრად გაზარდოს SAR-ის მნიშვნელობები ადამიანის სხეულის ქსოვილებში.
- ✓ ასევე, სასურველია ავტომწარმოებლებმა მანქანის შიდა ზედაპირი დაფარონ მშთანთქმელი ფენით, რაც მნიშვნელოვნად შეამცირებს ემ ველის გაზრდას მანქანაში.

- ✓ თავიდან ტელეფონამდე მანძილის ზდისას ველის მნიშვნელობა მცირდება მანძილის კვადრატის უკუპროპორციულად, და შესაბამისად მცირდება SAR ადამიანის თავის ქსოვილებში, ამიტომ სასურველია საუბრისას ტელეფონი მაქსიმალურად დავაშოროთ თავს, ანდა ვისარგებლოთ ხმამაღალი კავშირით (ე. წ. სპიკერით).
- ✓ სასურველია, მობილური ტელეფონის გამოყენების ხანგრძლივობა მაქსიმალურად იქნას შემცირებული. როგორც ცნობილია გამოსხივებასთან დაკავშირებულ ეფექტებს გააჩნიათ დაგროვების ბუნება.

გამოყენებული ლიტერატურა

- [1] M. Stuchly, A. Vander Vorst A. Rosen, "Applications of RF/Microwaves in medicine," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech*, vol. 50, no. 3, pp. 963-974, March 2002.
- [2] Narendra P. Singh Henry C. Lai, "Medical Applications of Electromagnetic Fields," in *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2010.
- [3] Grabowska K, Gabryelak T Miłowska K, "Applications of electromagnetic radiation in medicine," *Postepy Hig Med Dosw*, vol. 8, no. 68, pp. 473-82, May 2014.
- [4] P, Battisti, S, Checcucci, A, Comba, P, Grandolfo, M, Serio, A. Baroncelli, "A health examination of railway high-voltage substation workers exposed to ELF electromagnetic fields," *American Journal of Industrial Medicine*, vol. 10, pp. 45-55, 1986.
- [5] Liu G, Li Y, Song X. Zhang C, "SAR in human head model due to resonant wireless power transfer system," *Technol Health Care*, vol. 24 Suppl 2, pp. 739-746, Apr 29 2016.
- [6] Meng MQ, Li BP. Xu LS1, "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. 5060-3., 2009.
- [7] Hong SE, Kwon JH, Choi HD, Cardis E. Lee AK1, "Mobile phone types and SAR characteristics of the human brain," *Phys Med Biol*, vol. 62(7), pp. 2741-2761, Apr 7 2017.
- [8] WHO – World Health Organization. [Online]. <http://www.who.int/peh-emf/en/>.
- [9] ICNIRP, "Guidelines for limiting exposure to timevarying electric, magnetic and electromagnetic fields (up to 300 GHz)," *Health Physics*, vol. 74, pp. 494-522, April 1998.
- [10] IEEE Std (IEEE)., "Standard for Safety Level with Respect to Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields, 3KHz to 300GHz," 2005.
- [11] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, "Statement on the "Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic fields (up to 300 GHz)," (*ICNIRP*), 2009.
- [12] Prishvin, M; Bibilashvili, L; Zaridze, R, "Developing a thermal exemptions rationale for low-power transmitters," *Journal of Applied Electromagnetism*, vol. Vol 13, No 1, pp. pp. 39-57, June 2011.
- [13] M.I., Faruque, M.R.I., & Islam, M.T. Hossain, ""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.
- [14] Santomaa V, Kuster N. Drossos A, "The dependence of electromagnetic energy absorption

- upon human head tissue composition in the frequency range of 300–3000 MHz," (*IEEE Trans Microwave Theory Tech.*, pp. 1988–1995, 2000.
- [15] K.A.Hossmann and D.M.Hermann, "Effects of Electromagnetic Radiation of Mobile Phones on the Central Nervous System," *Bioelectromagnetics*, vol. 24, pp. 49–62, 2003.
- [16] International Agency for Research on Cancer. (2014, 3 Apr) http://www.iarc.fr/en/media-centre/pr/2011/pdfs/pr208_E.pdf.
- [17] Hardell L., "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, 2018 Jan.
- [18] Carlberg M, Hansson Mild K. Hardell L, "Use of mobile phones and cordless phones is associated with increased risk for glioma and acoustic neuroma," *Pathophysiology*, vol. 20(2), pp. 85–110, 2013 Apr.
- [19] Maria R. Scarfi Vijayalaxmi, "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, Sep 2014.
- [20] Anjana Verma, Charu Kohli, and Gopal Krishna Ingle. Jitendra Kumar Meena, "„Mobile phone use and possible cancer risk: Current perspectives in India“,," *Indian J Occup Environ Med*, vol. 20(1), pp. 5–9, Jan-Apr 2016.
- [21] Asadollah Habib, Amir Ganj-Karami, Raziieh Samimi-Doost, Atefe Pour-Abedi, Ali Babaie. Seyed Mortavazi, "Alterations in TSH and Thyroid Hormones following Mobile Phone Use," *Oman Med J*, vol. 24(4), pp. 274–278, Oct 2009.
- [22] Niño J, Halonen P, Kuusela T, Laitinen T, Länsimies E, Hartikainen J, Hietanen M, Lindholm H. Tahvanainen K, "Cellular phone use does not acutely affect blood pressure or heart rate of humans," *Bioelectromagnetics.*, vol. 25(2), pp. 73–83., Feb 2004.
- [23] Lin James C., "Electromagnetic fields in Biological Systems.," *CRS Press, Taylor&Francis group*, no. London NeW York, 2011.
- [24] Waldemar G.,Olsen J.H., Johnsen C. Schus J., "Risks for central nervous system diseases among mobile phone subscribers: a Danish retrospective cohort study.," *PLoS One*, vol. 4(2), Feb 5 2009.
- [25] Busljeta I. Trosic I, "Erythropoietic dynamic equilibrium in rats maintained after microwave irradiation Exp Toxicol Pathol.," vol. 57(3), pp. 247–251, 2006.
- [26] Patrizia Frei, Evelyn Mohler, Kerstin Hug Martin Röösl, "Systematic review on the health effects of exposure to radiofrequency electromagnetic fields from mobile phone base stations," *Bulletin of the World Health Organization*, vol. 88, pp. 887–896, 2010.

- [27] Meidanis J. Setubal JC, "Introduction to computational molecular biology," *PWS Publishing Company, Boston, USA.*, 1997.
- [28] "Report of Partial Findings from the National Toxicology Program Carcinogenesis Studies of Cell Phone Radiofrequency Radiation in Hsd: Sprague Dawley® SD rats (Whole Body Exposures)," bioRxiv, 2016.
- [29] SHUMEI S. GUO, CHRISTINE M. ZELLER, NICHOLAS V. REO, ROGER M. SIERVOGEL W. CAMERON CHUMLEA, "Total body water data for white adults 18 to 64 years of age:The Fels Longitudinal Study," *Kidney International*, vol. 56, pp. 244–252, 1999.
- [30] Berger EY, Dunning MF, Brodie BB Steele JM, "Total body water in man.," *Am J Physiol* , vol. 162, pp. 313–317, 1950.
- [31] Watson ID, Batt RD, Phil D Watson PE, "Total body water volumes for adult males and females estimated from simple anthropometric measurements.," *Am J Clin Nutr* , vol. 33, pp. 27–39, 1980.
- [32] Morgan LL, de Salles AA, Han Y-Y, Herberman RB, Davis DL. Gandhi OP, "Exposure limits: The underestimation of absorbed cell phone radiation, especially in children," *Electromagn Biol Med.*, vol. 31, pp. 34–51, 2012.
- [33] Jr Robert E. Tarone. John D. Boice, "Cell Phones, Cancer, and Children ," *JNCI: Journal of the National Cancer Institute*, vol. 103, no. 16, pp. 1211–1213, 17 August 2011.
- [34] Takayuki Asano , Osamu Fujiwara Akimasa Hirata, "FDTD analysis of body-core temperature elevation in children and adults for whole-body exposure," *Phys. Med. Biol*, vol. 53 , pp. 5223–5238, 2008.
- [35] M M Paulides, E Neufeld, A Christ, N Kuster, G C van Rhoon J F Bakker, "Children and adults exposed to electromagnetic fieldsat the ICNIRP reference levels: theoretical assessment of the induced peak temperature increase," *Phys. Med. Bio*, vol. 56, pp. 4967-4989, 2011.
- [36] Nasrollah Naghdi, Hamidreza Hemmati, Majid Asadi-Samani, Mahmoud Bahmani. Mosa Moradi, "Effect of Ultra High Frequency Mobile Phone Radiation on Human Health," *Electron Physician*, vol. 8(5), pp. 2452–2457, 2016 May.
- [37] Advisory group on non-ionising radiation, "Health effects from radiofrequency electromagnetic field," 2012.
- [38] Dean A, Eger H, Hubmann G, Jandrisovits R, Kern M, Kundi M, Moshhammer H, Lercher P, Müller K, Oberfeld G, Ohnsorge P, Pelzmann P, Scheingraber C, Thill R. Belyaev I, "EUROPAEM EMF Guideline 2016 for the prevention, diagnosis and treatment of EMF-related health problems and illnesses.," *US National Library of Medicine National Institutes*

- of Health, Rev Environ Health*, vol. 31, no. 3, pp. 363-397, Sep 1 2016.
- [39] P Bernardo, "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, MARCH 2003.
- [40] Om P. Gandhi, "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, OCTOBER 1996.
- [41] Akimasa Hirata, "Correlation between Maximum Temperature Increase and Peak SAR with Different Averaging Schemes and Masses," *IEEE TRANSACTIONS ON ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY*, 2005.
- [42] N. Aisyah-Husni, Md. Iqbal-Hossain, M. Tariqul-Islam and N. Misran M. R. Iqbal-Faruque, "Effects of Mobile Phone Radiation onto Human Head with Variation of Holding Cheek and Tilt Positions," *Journal of Applied Research and Technology*, vol. 12, pp. 871-876.
- [43] M Kivento J Keshvari, "Hand Effect on Head Specific Absorption Rate (SAR)," in *Radio and Antenna Days of the Indian Ocean (RADIO 2012)*.
- [44] Ferran Silva Gabriel Anzaldi, "Initial Analysis of SAR From a Cell Phone Inside a Vehicle by Numerical Computation," *IEEE TRANSACTIONS ON BIOMEDICAL ENGINEERING*, vol. 54, no. 5, May 2007.
- [45] F. Apollonio, R. Pinto, and M. Liberti Paffi, "Scenarios Approach to the Electromagnetic Exposure: The Case Study of a Train Compartment," Hindawi Publishing Corporation BioMed Research International, 2015.
- [46] A.K Dhami, "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.
- [47] WHO – World Health Organization. [Online]. <http://www.who.int/peh-emf/en/>
- [48] [Online]. <http://www.mmfaio.org/public/>
- [49] MMF/GSMA Dosimetry program phase II, "Developing a Thermal Exemptions Rationale for Low-Power Transmitters," 08.01.2008-30.09.2010.
- [50] IT'IS Foundation. [Online]. <http://www.itis.ethz.ch/news-events/news/virtual-population/enhanced-virtual-family-models-ella-duke-billie-thelonious/>
- [51] [Online]. <http://niremf.ifac.cnr.it/tissprop/htmlclie/htmlclie.htm#atsftag>
- [52] IT'IS Foundation. [Online]. <http://www.itis.ethz.ch/itis-for-health/tissue-properties/database/database-summary/>

- [53] [Online].
http://www.itis.ethz.ch/assets/Downloads/TissueDb/Files20150113/References_20150113.pdf
- [54] ლევან შოშიაშვილი, ცოცხალ ორგანიზმზე ელექტრომაგნიტური გამოსხივების გემოქმედების მოდელირება.: თბილისის სახელმწიფო უნივერსიტეტი, 2006.
- [55] Alexander Razmadze, *Investigation of Electromagnetic Field Exposure of Human Body.*: Tbilisi State University, 2009.
- [56] A. Razmadze, L. Shoshiashvili, D. Kakulia, R. Zaridze, "Influence on averaging masses on correlation between mass-averaged SAR and temperature rise," *Journal of Applied Electromagnetism*, vol. 10, no. 2, pp. pp. 8-21, December 2008.
- [57] მიხეილ პრიშვინი, სუსტი ელექტრომაგნიტური გამოსხივების გემოქმედების შესწავლა ადამიანის რეალისტურ მოდელზე.: თბილისის სახელმწიფო უნივერსიტეტი, 2011.
- [58] M. Prishvin, R. Zaridze, G. Bit-Babik, A. Faraone, "Improved Numerical Modeling of Heat Transfer in Human Tissue exposed to RF energy," *Australasian College of Physical Scientists and Engineers in Medicine*, November 2010.
- [59] Prishvin, M; Bibilashvili, L; Tabatadze, V; Zaridze, R, "Supplementary analysis of RF exposure simulations of low-power transmitters," *Journal of Applied Electromagnetism*, vol. Vol13, No1, pp. pp. 58-69, 2011.
- [60] ვერიკო ჯელაძე, ელექტრომაგნიტური გამოსხივების გემოქმედების შესწავლა ადამიანის მოდელზე მცირე მანძილებისთვის და ფართომასშტაბიანი სცენარებისთვის.: თბილისის სახელმწიფო უნივერსიტეტი, 2015.
- [61] I. Petoev, V. Tabatadze, M. Prishvin, R. Zaridze V. Jeladze, "Application of the Method of Auxiliary Sources to Study the Influence of Resonance Electromagnetic Fields on a Man in Large Spatial Domains," *Journal of Communications Technology and Electronics*, vol. 62, no. 3, pp. 195-204, March 2017.
- [62] A Taflove, *Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method, Third Edition.* Hardcover, 2005.
- [63] V Kupradze, *Dynamical Problems in Elasticity, Progress in Solid Mechanics 3.* Amsterdam, 1963.
- [64] V Kupradze, "About approximates solution of mathematical physics problem," *Success of Mathematical Sciences, Moscow*, vol. 22, no. 2, pp. pp.59-107, 1967.
- [65] Дж. А. Стрэттон, "Теория Электромагнетизма". Москва, 1948.
- [66] Prishvin, M; Zaridze, R; Bit-Babik, G; Faraone, A, "Improved numerical modelling of heat transfer in human tissue exposed to RF energy," *Australasian College of Physical Scientists and Engineers in Medicine*, vol. 33, no. 4, pp. pp. 307-17, November 2010.

- [67] IT'IS Foundation. [Online]. <http://www.itis.ethz.ch/itis-for-health/virtual-population/human-models/>
- [68] Constantine A. Balanis, *Antenna Theory, Analysis and Design*. New York, USA: John Wiley and Sons, INC, 1997.
- [69] И.И. М. Петоев, V. A. Tabatadze, D. G. Kakulia, and R. S. Zaridze, "Method of Auxiliary Sources Applied to Thin Plates and Open Surfaces," *Journal of Communications Technology and Electronics*, vol. 60, no. 4, pp. pp. 311-320, 2015.
- [70] R. Zaridze, V. Jeladze, V. Tabatadze, I. Petoev, M. Prishvin T. Nozadze, "Human Exposure Study for Some Scenarios," *Journal of Applied Electromagnetism (JAE)*, vol. 19, pp. 9-16, 2017.