

აკაკი წერეთლის სახელმწიფო უნივერსიტეტი  
საინჟინრო-ტექნიკური ფაკულტეტი

ხელნაწერის უფლებით

ნიკა თოფურია

დასხივების ოპტიმალური პარამეტრების  
დადგენა უწყვეტი არაერთგვაროვანი არის  
დაზიანებული მიდამოსათვის

ინჟინერიის დოქტორის აკადემიური ხარისხის  
მოსაპოვებლად წარმოდგენილი დისერტაციის

ავტორეფერატი

0719 - სამრეწველო ინჟინერია და ტექნოლოგია

ქუთაისი, 2020 წელი

აკაკი წერეთლის სახელმწიფო უნივერსიტეტი  
საინჟინრო-ტექნიკური ფაკულტეტი

სამეცნიერო ხელმძღვანელი: პროფესორი ომარ კიკვიძე

რეცენზენტები: ფიზ. მათ. მეც. დოქტორი, პროფესორი  
აკაკი გირგვლიანი  
აკად. დოქტორი, ასოც. პროფესორი  
ამირან ბრეგვაძე

დისერტაციის დაცვა შედგება \_\_\_29/10/2020\_\_ 14:00\_\_  
(თარიღი და დრო)

საინჟინრო - ტექნიკური ფაკულტეტის სადისერტაციო  
საბჭოს მიერ შექმნილ სადისერტაციო კომისიის  
სხდომაზე. მისამართი: ქუთაისი. თამარ მეფის ქუჩა  
59, I კორპუსი, აუდიტორია №1114

დისერტაციის გაცნობა შესაძლებელია აკაკი  
წერეთლის სახელმწიფო უნივერსიტეტის  
ბიბლიოთეკაში მისამართზე: 4600. ქუთაისი. თამარ  
მეფის ქ. 59.

ავტორეფერატი გაიგზავნა “\_\_\_\_\_” \_\_\_\_\_  
(თარიღი)

სადისერტაციო საბჭოს მდივანი

\_\_\_\_\_  
/ნ. სახანბერიძე/

### თემის აქტუალობა

ტექნიკისა და ტექნოლოგიების განვითარებასთან ერთად რთულდება ის ამოცანებიც რომელთა გადაჭრადაც თანამედროვე მკვლევარებს უხდებათ. მიუხედავად იმისა, რომ თანამედროვე კომპიუტერული ტექნოლოგიები იძლევა საშუალებას წარმოდგენილი სირთულის ამოცანები გონივრულ ვადებში გადავჭრათ, ხშირად საკვლევ პროცესის სირთულე გამოთვლების დროს დღეების, ან კვირების მანძილზე ახანგრძლივებს, რაც ცხადია ნებისმიერი მკვლევარისთვის სერიოზული დისკომფორტია. ასეთი ტიპის ერთ-ერთი წარმომადგენელია მრავალფაქტორული ოპტიმიზაციის ამოცანები.

ოპტიმიზაციის ყველაზე ადრეული მეთოდები წრფივი ალგებრის გამოყენებით მარტივი ფუნქციების ექსტრემუმების პოვნა იყო. პიერ ფერმა და ჯოზეფ-ლუის ლაგრანჟი პირველები იყვნენ, ვინც ოპტიმუმის პოვნის მეთოდი შეიმუშავეს წრფივი ალგებრის გამოყენებით. ისააკ ნიუტონმა და იოჰან გაუსმა კი საფუძველი ჩაუყარეს ოპტიმიზაციის იტერაციული მეთოდების განვითარებას.

წრფივი პროგრამირების ახლანდელი სახე 1939 წელს ლეონიდ კანტოროვიჩმა შეიმუშავა, ხოლო ცნობილი სიმპლექს მეთოდის შესახებ სამეცნიერო სტატია 1947 წელს ჯორჯ დანციგმა გამოაქვეყნა. მას შემდეგ არაერთი ოპტიმიზაციის მეთოდი შეიქმნა, რომელთა შორის გამოყენებადობის თვალსაზრისით შეიძლება რამდენიმეს გამორჩევა: გრადიენტული დაშვების მეთოდი, ნიუტონის მეთოდი, ოპტიმიზაცია საჯარიმო კოეფიციენტების გამოყენებით, ოპტიმიზაცია ევრისტიკული მეთოდების გამოყენებით.

ოპტიმიზაციას ასევე მოიხსენიებენ როგორც მათემატიკურ პროგრამირებას ან როგორც მათემატიკურ

ოპტიმიზაციას. 70-ანი წლების შემდეგ ოპტიმიზაცია დიდ კვლევის მიმართულებად ჩამოყალიბდა და გამოიკვეთა რამდენიმე ძირითადი ქვემიმართულება: წრფივი პროგრამირება, არაწრფივი პროგრამირება, ოპტიმიზაცია სასაზღვრო პარამეტრების გარეშე, ოპტიმიზაცია სასაზღვრო პარამეტრების გამოყენებით, ერთ და მრავალ ფაქტორიანი ოპტიმიზაცია, დინამიური პროგრამირება.

ჩამოთვლილთაგან წრფივი, ერთ ფაქტორიანი ოპტიმიზაცია თავისი სიმარტივის გამო ყველაზე სწრაფად განვითარდა და დღესდღეობით გამოიყენება ლოჯისტიკის, საბანკო საქმისა და ეკონომიკური მიმართულებებით.

რაც შეეხება არაწრფივ, მრავალფაქტორიან ოპტიმიზაციის ამოცანებს - აქ საქმე უფრო რთულადაა და ცნობილი მეთოდებით მათი გადაწყვეტა უხეში მიახლოებების, შედეგების ხარისხის შემცირების და ხანგრძლივი გამოთვლების გარეშე ძალიან ძნელია. სამწუხაროდ საინჟინრო ამოცანების აბსოლუტური უმრავლესობა არაწრფივი და მრავალფაქტორიანია.

ოპტიმიზაციის პროცესები აქტიურად გამოიყენება სამედიცინო ინჟინერიის სფეროში. დისერტაციაში განხილული ამოცანა ინჟინერიის სწორედ ამ მიმართულებიდანაა და ეხება სხივურ თერაპიაში, პაციენტის დასხივების IMRT (Intensity Modulated Radiation Therapy - ინტენსიობა მოდულირებადი რადიაციული თერაპია) ტექნიკისთვის ოპტიმალურ კუთხეთა შერჩევის პრობლემას.

### **კვლევის საგანი და პრობლემატიკა**

კვლევის საგანს წარმოადგენს სამედიცინო ინჟინერიის ერთერთი თანამედროვე პრობლემა, კერძოდ, სხივური თერაპიის დინამიური ტექნიკის, IMRT-ის განხორციელებისთვის ოპტიმალური კუთხეების შერჩევის

პროცესი. მიუხედავად იმისა, რომ ნაშრომში განხილული კუთხეთა შერჩევისა და ოპტიმიზაციის მეთოდების ეფექტურობა ექსპერიმენტულად არის დადასტურებული, ფაქტია, რომ მათი გამოყენება საჭიროებს მნიშვნელოვან დროს გამოთვლების შესასრულებლად, რაც, თავის მხრივ წარმოადგენს სერიოზულ დაბრკოლებას დამგეგმარებლისთვის და ხშირ შემთხვევაში არამომგებიანს ხდის მათ გამოყენებას.

მეორე და შეიძლება ითქვას უმთავრესი პრობლემა ალგორითმების ნაადრევი კონვერგენცია და ლოკალურ მინიმუმში ჩარჩენაა. ჩვენს მიერ შერჩეული ალგორითმი კი თავისი ძირეული მოქმედების პრინციპებიდან გამომდინარე იძლევა საშუალებას საწყისი პარამეტრების სწორი შერჩევის შემთხვევაში აღნიშნულ პრობლემას თავი დავაღწიოთ.

ამოცანას ართულებს საოპტიმიზაციო არის არაერთგვაროვნებაც. უნდა გავითვალისწინოთ, რომ ადამიანის ორგანიზმი არაერთგვაროვანია, როგორც შემადგენელი ქსოვილების სიმკვრივის, ისე ზედაპირის უსწორმასწორობების თვალსაზრისით. ვინაიდან საუბარია პრობლემის გამოთვლითი მეთოდებით გადაჭრაზე, უნდა გავითვალისწინოთ ასევე პრინციპული განსხვავებები საოპტიმიზაციო არეში მყოფ ქსოვილებს შორის, მაგალითად, ჯანსაღი, დაზიანებული, კრიტიკული და ნაკლებად კრიტიკული ორგანოები საჭიროებენ ინდივიდუალურ მიდგომას, რაც მნიშვნელოვანი ფაქტორია საოპტიმიზაციო არის არაერთგვაროვნების განხილვისას.

### **კვლევის მიზანი და ამოცანები**

სადისერტაციო ნაშრომის მიზანს წარმოადგენს რადიაციულ ონკოლოგიაში ფართოდ გამოყენებადი IMRT დასხივების მეთოდის გამოყენების გამარტივება, მიღებული

დასახივების გეგმის ხარისხის გაუმჯობესება საერთაშორისოდ მიღებული ხარისხის შეფასების კრიტერიუმების გათვალისწინებით და IMRT დასახივების გეგმის შედგენის გარკვეული ეტაპის ავტომატიზირება.

კვლევის ამოცანაა არსებულ მათემატიკურ მოდელებზე დაყრდნობით IMRT დასახივების კუთხეთა ოპტიმიზაციის ამოცანის დასმა და მისი გადაწყვეტა ევრისტიკული მეთოდების, კერძოდ გენეტიკური ალგორითმების გამოყენებით. რაც მიმართული იქნება, როგორც გამოთვლითი პროცესების დროის შემცირების, ისე ოპტიმიზაციის შედეგად მიღებული გეგმის ხარისხის გაუმჯობესებისკენ.

### **კვლევის მეთოდები**

კვლევაში გამოყენებულია რადიაციული თერაპიის გეგმის შედგენის, ოპტიმიზაციისა და დოზის დათვლის პროგრამული უზრუნველყოფა MatRad. დამუშავებული ალგორითმი შედგენილია MATLAB დაპროგრამების ენაზე. მეთოდის ეფექტურობა შემოწმდა 12 სატესტო კლინიკურ შემთხვევაზე და გაკეთდა რიცხოვრივი შედარება სხვა, კლინიკურად აპრობირებულ მეთოდთან. ექსპერიმენტული კვლევისთვის საჭირო კომპიუტერული ტომოგრაფიები აღებულია ქუთაისის ონკოლოგიის ცენტრის მონაცემთა ბაზიდან. პაციენტთა ინფორმაცია სრულად ანონიმურია.

### **კვლევის სამეცნიერო სიახლე**

ნაშრომის მეცნიერული სიახლე შეგვიძლია წარმოვადგინოთ შემდეგ პუნქტებად:

- არსებული მათემატიკური მოდელების ბაზაზე შემუშავებული იქნა IMRT მეთოდით დასახივების კუთხეთა ოპტიმიზაციის ხერხი

- შემუშავებული იქნა ამოცანაზე მორგებული გენეტიკური ტიპის ალგორითმი, რომელიც გვამღევს ოპტიმალურთან მაქსიმალურად მიახლოებულ შედეგებს მისაღებ ვადებში
- შემუშავებული ალგორითმი ოპტიმიზაციის კომერციულ მეთოდებთან შედარებით იძლევა ჯანსაღი ორგანოების დაცვის უკეთეს ხარისხს დასახივებელი არის დაფარვის გაუარესების გარეშე.

### **პრაქტიკული ღირებულება**

კვლევის ფარგლებში შემუშავებული მოდელი და ალგორითმი ოფიციალური ტესტირებისა და შეფასების შემდეგ შეიძლება გამოყენებულ იქნას კლინიკურ პრაქტიკაში, რაც დარგის პროფესიონალებს მნიშვნელოვნად შეუწყობს ხელს რთული და არასტანდარტული არეების დასხივების გეგმების მაღალი ხარისხით და მისაღებ ვადებში შედგენაში.

ნაშრომში გამოყენებული პროგრამული კოდი უფასოდ იქნება ხელმისაწვდომი ონლაინ დისტრიბუციის სისტემა GitHub-ზე, ასევე იგეგმება ჩვენს მიერ შემუშავებული ოპტიმიზაციის მეთოდის დამატება MatRad-ის პროგრამულ უზრუნველყოფაში ახალი მოდულის სახით, რაც ხელს შეუწყობს სხვა მკვლევარებს აღნიშნული მიმართულებით კვლევების ჩატარებასა და მიღებული პროგრამული კოდით სარგებლობაში.

### **სამუშაოს აპრობაცია**

სადისერტაციო ნაშრომის ძირითადი დებულებები მოხსენებული და განხილული იყო შემდეგ სამეცნიერო კონფერენციებზე:

1. გენეტიკური ალგორითმის გამოყენება გავრცელებული საოპტიმიზაციო ამოცანების ამოხსნისთვის, საქართველოს მექანიკოსთა კავშირის IX ყოველწლიური საერთაშორისო კონფერენცია, გვ. 48, 81-82. ქუთაისი, 2018
2. КРИТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ВЫБОРА УГЛОВ ОБЛУЧЕНИЯ ВІМРТ ТЕХНИКЕ ЛУЧЕВОЙ ТЕРАПИИ, Актуальные вопросы прикладной физики и энергетики, стр. 210-212. Сумгаит, 2018
3. გამოთვლების პარალელიზაციის ეფექტურობა თანამედროვე მრავალი ცვლადის ოპტიმიზაციის ამოცანების ამოხსნისას, საქართველოს მექანიკოსთა კავშირის X ყოველწლიური საერთაშორისო კონფერენცია, გვ. 75, 88. თელავი, 2019

ასევე, ძირითადი დებულებები განხილული იყო „აკაკი წერეთლის სახელმწიფო უნივერსიტეტის“ ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციისა და მექანიკა-მანქანათმშენებლობის დეპარტამენტების სხდომებზე 2017, 2018, 2020 წლებში.



### გამოქვეყნებული მასალები

სადისერტაციო თემის გარშემო გამოქვეყნებულია 4 ნაშრომი, მათ შორის საერთაშორისო რეცენზირებად ჟურნალებში:

1. გენეტიკური ალგორითმი IMRT მრავალი ცვლადის ოპტიმიზაციის ამოცანის ამოხსნისათვის, აკაკი წერეთლის სახელმწიფო უნივერსიტეტის მოამბე, 2018, N1(11), 229-237 გვ.
2. სხეულის მოძრაობის გეომეტრია IMRT დასხივების ოპტიმიზაციის ამოცანაში, აკაკი წერეთლის სახელმწიფო უნივერსიტეტის მოამბე, 2019, N2(14), 176-182 გვ.
3. Application of Genetic Algorithm in Common Optimization Problems, International Annals of Science, Volume8, Issue1, pp. 17-21, Jul 2019, DOI: <https://doi.org/10.21467/ias.8.1.17-21>
4. Application of genetic algorithm to solve BAO problem, International Journal of Latest Research in Engineering and Technology, Volume 6, Issue 5, pp. 01-05, 2020. ISSN: 2454-503, PIF - 3.108

### სამუშაოს სტრუქტურა და მოცულობა

წარმოდგენილი ნაშრომის მოცულობა შეადგენს 116 ნაბეჭდ გვერდს, რაც მოიცავს შესავალს, 4 თავს, დასკვნებს და რეკომენდაციებს, გამოყენებული ლიტერატურის ჩამონათვალს და დანართებს. პირველი თავი ეთმობა არსებული საოპტიმიზაციო მეთოდების მიმოხილვას,

კრიტიკულ შეფასებას მაგალითის საფუძველზე და საკვლევი ამოცანის დასმას. მე-2 და მე-3 თავები შესაბამისად ეთმობა მათემატიკური მოდელისა და ოპტიმიზაციის ალგორითმის შექმნას, მე-3 თავში ასევე მოცემულია ალგორითმის გამართული მუშაობის შესამოწმებლად ჩატარებული რიცხვითი გამოთვლების შედეგები. მე-4 თავი ეთმობა მიღებული მოდელისა და საოპტიმიზაციო ალგორითმის ექსპერიმენტულ შემოწმებას რეალურ მაგალითებზე. ნაშრომის ბოლოს წარმოდგენილია რეკომენდაციები და დასკვნები. დანართებში ნაჩვენებია შემუშავებული პროგრამით მიღებული რამდენიმე გეგმის დოზიმეტრიული მონაცემები.

### **ნაშრომის მოკლე შინაარსი**

ნაშრომის შესავალში ნაჩვენებია საკვლევი თემის აქტუალობა, განსაზღვრულია კვლევის მიზნები, ამოცანები და პრაქტიკული ღირებულება.

**პირველ თავში** მოცემულია საინჟინრო სფეროში გამოყენებული ოპტიმიზაციის მეთოდების მიმოხილვა. წარმოჩენილია საკვლევი თემის აქტუალობა და განხილულია პრობლემის გარშემო შექმნილი სამეცნიერო ნაშრომები. საინჟინრო ოპტიმიზაციის ამოცანების მაგალითად მოყვანილია ავტომობილის ლონჟერონული ტიპის შასის ოპტიმიზაცია, რომელიც განხორციელდა სასრული ელემენტების მეთოდით, მყარი სხეულების მოდელირების პროგრამა CATIA-ს და სიმულაციისა და ანალიზის პროგრამა ANSYS-ში. ასევე განხილული იქნა ბელგიის ენერჯო-გამანაწილებელი ქსელის ოპტიმიზაციის ამოცანის გადაწყვეტა ევრისტიკული ტიპის ალგორითმის (ACO – Ant Colony Optimization Algorithm) გამოყენებით, სადაც

ნაჩვენებია, თუ რამდენად ეფექტურია ევრისტიკული მიდგომები დიდი საძიებო არის მქონე ამოცანებზე სამუშაოდ. მოკლედ არის განხილული თანამედროვე სამედიცინო ინჟინერიაში არსებული ოპტიმიზაციის ამოცანები, კერძოდ, სხივური თერაპიის მიმართულებით. ნაჩვენებია IMRT (Intensity Modulated Radiation Therapy) ტექნიკით დასხივებისას ოპტიმალურ კუთხეთა შერჩევის მნიშვნელობა, სირთულე და არსებული მიდგომები. კერძოდ, განხილულია დასხივების კუთხეთა შერჩევა სიმპლექს და გრადიენტული დაშვების მეთოდებით, ნაჩვენებია თითოეულის დადებითი და უარყოფითი მხარეები. სტოქასტური მეთოდებიდან კი განხილულია სიმულირებული წრთობისა და ევოლუციური ტიპის ალგორითმების გამოყენების მაგალითები. თემის გარშემო არსებული სამეცნიერო შრომების გათვალისწინებთ დასმული იქნა კვლევის ამოცანები.

**მეორე თავში** მოცემულია დასხივების კუთხეთა შერჩევის მათემატიკური მოდელების მიმოხილვა, თემასთან დაკავშირებული ძირითადი განსაზღვრებები და შერჩეული კუთხეების გამოყენებით შედგენილი გეგმის ხარისხის მაჩვენებლების შეფასების მეთოდები. შერჩეული იქნა მოქნილი ოპტიმიზაციის ფუნქცია:

$$\min_{w \in R^B} f(w) = \sum_n p_n f_n(w)$$

$$c_k^l \leq c_k(w) \leq c_k^u$$

$$0 \leq w$$

სადაც  $f(w)$  არის ჯამური სამიზნე ფუნქცია, რომელიც შედგება ჩვენს მიერვე შერჩეული ინდივიდუალური კომპონენტებისგან  $f_n(w)$  გამრავლებული პირობით

წონაზე/პრიორიტეტზე  $P_n$ .  $c_k^l$  და  $c_k^u$  წარმოადგენს ზედა და ქვედა ზღვრებს  $Ck(w)$  ფუნქციისთვის. სამიზნე ფუნქციის კომპონენტებად კი შერჩეულ იქნა შემდეგი საჯარიმო ფუნქციები:

$$f_{sq \text{ deviation}} = \frac{1}{N_s} \sum_{i \in S} (d_i - \hat{d})^2$$

$$f_{mean} = \frac{1}{N_s} \sum_{i \in S} d_i$$

$$f_{\min DVH} = \frac{1}{N_s} \sum_{i \in S} \Theta(\hat{d} - d_i) \Theta(d_i - \bar{d}) (d_i - \hat{d})^2$$

$$f_{\max DVH} = \frac{1}{N_s} \sum_{i \in S} \Theta(d_i - \hat{d}) \Theta(\bar{d} - d_i) (d_i - \hat{d})^2$$

სადაც:  $d_i$  - დოზა  $i$  ვოქსელში

$\hat{d}$  - ექიმის მიერ გამოწერილი დოზა

$\bar{d}$  - დოზა სამიზნე მოცულობაზე

$S$  - განსაზღვრული სტრუქტურა

$N_s$  - ვოქსელების რაოდენობა  $S$  სტრუქტურაში

$\Theta(x)$  - ჰევისაიდის ფუნქცია

წარმოდგენილია სხეულის მოძრაობის გეომეტრია IMRT დასახივების ოპტიმიზაციის ამოცანაში. შედგენილ იქნა მობრუნების მატრიცა, რომელიც მოგვცემს საშუალებას განვსაზღვროთ სხეულში არსებული ნებისმიერი წერტილის მდებარეობა მის გარშემო მოძრავი დასახივების აპარატის მიმართ. ასევე, წარმოდგენილია ჯანსაღ და დასახივებელ

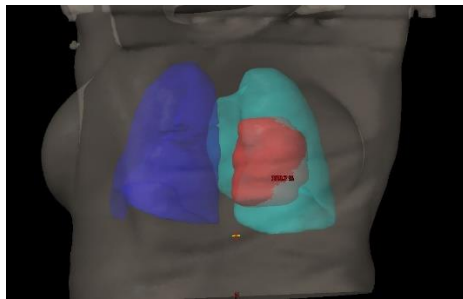
ორგანოთა თანაკვეთის შემთხვევაში აშკარად გამოუსადეგარი ველების გამორიცხვის მათემატიკური აპარატი.

**მესამე თავში** აღწერილია შერჩეული ალგორითმის გამოყენებით მუშა პროგრამის შედგენისა და პირველადი ტესტირების შედეგები. კვლევის პროცესში გამოსაყენებლად შერჩეულ იქნა გენეტიკური ალგორითმი, რომლის უმთავრესი უპირატესობა ალტერნატივებთან შედარებით არის მუტაციის მექანიზმი, რომელიც რანდომიზირებული მეთოდებით ახდენს ლოკალურ მინიმუმში ჩარჩენის ალბათობის გამორიცხვას. ალგორითმი რეალიზირებულ იქნა სხივური თერაპიის დაგეგმარების გახსნილი კოდის მქონე პროგრამა MatRad-ის ბაზაზე. MatRad მოიცავს იმ საბაზისო ბიბლიოთეკებს, რომელიც აუცილებელია დასხივების შედეგად მიღებული დოზის განაწილების დათვლისთვის და შედეგების დამუშავებისთვის. პროგრამის დასაწერად გამოყენებულ იქნა MATLAB დაპროგრამების ენა.

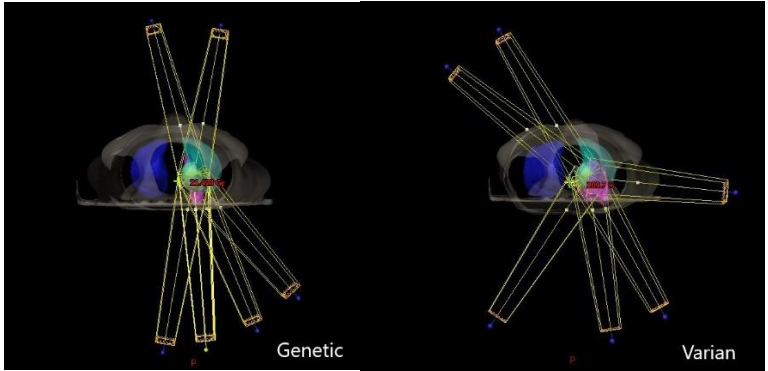
შედგენილი სისტემის ექსპერიმენტული გამოცდისთვის შერჩეული იქნა სამი - ტვინის, ფილტვის და კანის სიმსივნის კლინიკური შემთხვევა. თითოეულისთვის ჩატარდა დასხივების კუთხეთა ოპტიმიზაცია კვლევის დროს შემუშავებული მეთოდით, ხოლო შედარებისთვის, იგივე პარამეტრების გამოყენებით ჩატარდა ოპტიმიზაცია კლინიკურად აპრობირებული, სტანდარტული პროგრამული უზრუნველყოფის გამოყენებით. სამივე შემთხვევაში გენეტიკურმა ალგორითმმა მისაღებ დროში მოგვცა კონკურენტთან შედარებით უკეთესი დოზის განაწილება, როგორც დასხივების სამიზნე მოცულობაზე ისე მასთან მიმდებარე კრიტიკულ ორგანოებზე. წინასწარ შერჩეული

ხარისხის ინდიკატორებიც სამივე შემთხვევაში დამაკმაყოფილებელია.

**მეოთხე თავი** სრულად ეთმობა შემუშავებული ოპტიმიზაციის მეთოდის ექსპერიმენტულ ტესტირებას. კერძოდ, გამოთვლები ჩატარდა 3 თავის ტვინის კიბოს, 3 ფილტვის კიბოსა და 3 ლიმფომის რეალური კლინიკური შემთხვევისთვის. შედარებისთვის, იგივე პაციენტებისთვის ოპტიმიზაცია ჩატარდა ალტერნატიული, კლინიკურად აპრობირებული გამოთვლითი მეთოდის საშუალებითაც, ძირეული პარამეტრების შეცვლის გარეშე. თითოეულ შემთხვევაში გენეტიკურმა ალგორითმმა აჩვენა უკეთესი შედეგები ალტერნატიულ დეტერმინისტულ მეთოდთან შედარებით (ნახ 1,2)(ცხრილი 1). გამოთვლებმა ცხადყო, რომ მუტაციის პარამეტრი ეფექტურად მუშაობს და არ აძლევს ალგორითმს ლოკალურ მინიმუმზე ჩარჩენის საშუალებას, რაც სერიოზულ პრობლემას წარმოადგენს ალტერნატიული დეტერმინისტული მეთოდისთვის. აღსანიშნავია, რომ 3 შემთხვევაში გენეტიკურ ალგორითმს ოპტიმალური შედეგების მისაღებად უფრო ცოტა ველი დასჭირდა, ვიდრე კონკურენტს, რაც თავის მხრივ დადებითი მაჩვენებელია.



ნახ. 1 დასახივებელი ქსოვილის (წითელი) ლოკაცია



ნახ. 2 გენეტიკური და ვარიანის ალგორითმების მიერ შერჩეულ კუთხეთა განლაგება პაციენტის გარშემო

ცხრილი 1 ოპტიმიზაციის შედეგად მიღებული დოზიმეტრული შედეგები

რისკ-ორგანო	დასაშვები დოზა	მიღებული დოზა (Genetic)	მიღებული დოზა (Varian)
ფილტვები (ორივე ერთად)	საშუალო < 23 Gy V20 < 35%	საშუალო = 3.2 Gy V20 = 10%	საშუალო = 3.5 Gy V20 = 10.1%
გული	V45 < 67% V60 < 33%	N/A N/A	N/A N/A
ზურგის ტვინი	Max < 50 Gy	Max = 7.3 Gy	Max = 10.9 Gy

## ძირითადი შედეგები და დასკვნები

ნაშრომში განხილული საკითხების თეორიული და ექსპერიმენტული კვლევის შედეგად გამოიკვეთა შემოთავაზებული ოპტიმიზაციის მეთოდის ძლიერი და სუსტი მხარეები, განისაზღვრა საკითხები, რომლებიც საჭიროებენ შემდგომ კვლევას და დახვეწას. კვლევის შედეგები შეგვიძლია შევაჯამოთ რამდენიმე ძირითად პუნქტში:

1. შერჩეულია ნაშრომში დასმულ ამოცანაზე მორგებული მათემატიკური მოდელი და შემოთავაზებულია მინიმიზაციის ფუნქციაში შემავალი საჯარიმო კომპონენტების ოპტიმალური კომბინაცია.
2. დამუშავებულია გენეტიკური ალგორითმის ადაპტირებული ვერსია დასხივების ოპტიმალური პარამეტრების შერჩევის ამოცანისთვის.
3. შერჩეული მოდელის და ალგორითმის გათვალისწინებით შემუშავებულია პროგრამული უზრუნველყოფა MATLAB დაპროგრამების ენაზე.



4. შემუშავებული სისტემის ექსპერიმენტულმა გამოცდამ ყველა განხილულ შემთხვევაში აჩვენა კლინიკური თვალსაზრისით მისაღები შედეგები, მათ შორის, საშუალოდ 7%-ანი გაუმჯობესება (Varian-ის ოპტიმიზაციის პროგრამასთან შედარებით) ფილტვის დოზებში, 67%-ანი გაუმჯობესება თვალის, 126.5%-ანი და 143%-ანი გაუმჯობესება შესაბამისად ლინზებისა და ჰიპოფიზის დოზებში.
5. გენეტიკურ ალგორითმში გათვალისწინებულმა მუტაციის პარამეტრმა ყველა განხილულ შემთხვევაში ეფექტურად მოახდინა ლოკალურ ოპტიმუმში ჩარჩენის პრევენცირება.
6. ოპტიმიზაციის დრო საშუალოდ 10-ჯერ იქნა შემცირებული 12 პარალელური მთვლელის გამოყენებით, სტანდარტულ 1 მთვლელთან შედარებით.

Akaki Tsereteli State University  
*Faculty of Technical Engineering*

Copyrighted manuscript

Nika Topuria

Determination of optimal irradiation parameters for  
continuous  
non-uniform damaged area

The Author's Abstract

Of the Doctoral Thesis Nominated for Academic Degree  
Of the Doctor of Science in Engineering

0719 – Industrial Engineering and Technology

Kutaisi, 2020

The Doctoral Thesis has been performed at the Department of Energy and Telecommunications of Akaki Tsereteli State University

Scientific advisor: Omar Kikvidze, Doctor of Technical Sciences

Official reviewers: Doctor of Physics and Mathematics, Professor Akaki Girgvliani  
Academic Doctor, Associate Professor Amiran Bregvadze

Defense of a thesis will be held 29/10/2020 14:00  
(date and time)

At the session of the Dissertation Commission created by Dissertation Council of the Faculty of Technical Engineering. Address: Auditorium N1114, Building I, 59 Tamar Mepe st., 4600, Kutaisi.

The Doctoral Thesis is available in the library of Akaki Tsereteli State University at the address: 59 Tamar Mepe Street, 4600, Kutaisi.

The Author's Abstract had been sent out “ \_\_\_\_\_ ”

Secretary of the Dissertation Council \_\_\_\_\_

/N. Sakhanberidze/

### **Topicality of research**

With the development of technology, the problems that modern researchers have to solve become more difficult. Although modern computer technology allows us to solve tasks of incredible complexity in a reasonable amount of time, quite often the complexity of the research process prolongs calculations over days or weeks, which is obviously a serious inconvenience for any researcher. One of the representatives of this type of problems is the multi-factor optimization tasks.

The earliest methods of optimization were to find extremes of simple functions using a linear algebra. Pierre Fermat and Joseph-Louis Lagrange were the first to develop the method of finding the optimum using a linear algebra. Isaac Newton and Johann Gauss laid the groundwork for the development of iterative methods of optimization.

The current form of linear programming was developed by Leonid Kantorovich in 1939, and a scientific article on the famous Simplex method was published in 1947 by George Dantzig. Since then, a number of optimization methods have been developed, some of which can be distinguished in terms of usability: gradient descent method, Newton's method, optimization using penalty coefficients, optimization using heuristic methods.

Optimization is also referred to as mathematical programming or as mathematical optimization. After the 1970s, optimization developed into a major research direction and identified several key sub-areas: linear programming, nonlinear programming, optimization without boundary parameters, optimization using boundary parameters, single and multi-factor optimization, dynamic programming.

Linear optimization has developed most rapidly due to its simplicity and is currently used in logistics, banking and economics.

As for the problems of nonlinear, multi-factor optimization - it is more complex and with known methods it is quite difficult to solve them without rough approximations, reducing the quality of result. Unfortunately, the vast majority of engineering tasks are nonlinear and multifactorial.

Optimization processes are actively used in the field of medical engineering. The task discussed in the dissertation is in this direction of engineering and deals with the problem of selecting the optimal angles for radiation techniques in radiation therapy, IMRT (Intensity Modulated Radiation Therapy - Intensity Modular Radiation Therapy).

### **Research subject**

The subject of the study is one of the modern problems of medical engineering, namely, the process of selecting the optimal angles for the implementation of dynamic techniques of radiation therapy, IMRT. Although the effectiveness of the methods of selecting and optimizing the angles discussed in the paper has been experimentally proven, the fact is that their use requires considerable time to perform the calculations. This, in turn, poses a serious obstacle to the planner and often makes their use infeasible.

The second and arguably the most important problem is the premature convergence of algorithms and sticking to the local minimum. The algorithm selected by us, based on the principles of its basic operation, allows us to get rid of this problem in case of correct selection of the initial parameters.

The heterogeneity of the search area is complicating the task of optimization as well. We must bear in mind that the human body is heterogeneous in terms of both the density of the constituent tissues and the irregularities of the surface. Since the problem is solved by computational methods, we must also take into account

the fundamental differences between the tissues in the area of optimization, for example, healthy, damaged, critical and less critical organs require an individual approach, which is an important factor in optimizing diversity.

### **Research aim and goals**

The aim of the dissertation is to simplify the use of the widely used IMRT irradiation method in radiation oncology, improve the quality of the produced irradiation plan taking into account the internationally accepted quality evaluation criteria and automate a certain stage of compiling the IMRT irradiation plan.

The task of the study is to solve the problem of optimizing IMRT irradiation angles based on existing mathematical models and solve it using heuristic methods, in particular, using genetic algorithms - both reducing the time of computational processes and improving the quality of the plan.

### **Methods of research**

MatRad software is used to create, optimize and calculate dose distribution of treatment plans. The processed algorithm is realized in MATLAB programming language. The effectiveness of the method was tested on 12 test clinical cases and a numerical comparison was made with another, clinically proven method. The computed tomography images required for the experimental study is taken from the database of the Kutaisi Oncology Center. Patient information is completely anonymous.

### **Novelty of the research**

The scientific novelty of the paper can be presented in the following points:

- On the basis of existing mathematical models, the method of optimization of irradiation angles by IMRT method has been developed.
- A genetic algorithm tailored to the task has been developed, which gives us the results that are as close as possible to the optimal in the acceptable time without being prone to local optima entrapment.
- The developed algorithm, in comparison with the commercial methods of optimization, gives a better quality of protection of healthy organs.

### **Practical bearing of work**

The model and algorithm developed as part of the study can be used in clinical practice after official testing and evaluation. This will significantly help professionals in the field of creating radiation plans for complex and non-standard areas, with good dose distribution and acceptable speed.

The software source code used in the paper will be available for free on the online distribution system GitHub, and we also plan to add an optimization method developed by us to the MatRad software as a new module to help other researchers conduct experiments in this area and using our software.

### **Approbation of work**

The main provisions of the dissertation were presented and discussed at the following scientific conferences:

1. Use of genetic algorithm to solve common optimization problems, IX Annual International Conference of Georgian Mechanics Union, pp. 48, 81-82. Kutaisi, 2018

2. КРИТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ВЫБОРА УГЛОВ ОБЛУЧЕНИЯ ВІМРТ ТЕХНИКЕ ЛУЧЕВОЙ ТЕРАПИИ, Актуальные вопросы прикладной физики и энергетики, стр. 210-212, Сумгаит, 2018
3. Effectiveness of Computation Parallelisation in Solving the Optimization Problems of Many Modern Variables, X Annual International Conference of the Union of Mechanics of Georgia, pp. 75, 88. Telavi, 2019

Also, the main provisions were discussed at the meetings of Akaki Tsereteli State University, Department of Energy and Telecommunications and Department of Mechanics and Mechanical Engineering in 2017-2018.

### **Publications**

There are 4 papers published around the dissertation topic, including two in international peer-reviewed journals:

1. Use of genetic algorithms to solve multi-variable optimization problem, Akaki Tsereteli State University Press “Moambe”, 2018, N1 (11), pp. 229-237.
2. Geometry of body movement in the IMRT optimization problem, Akaki Tsereteli State University Press “Moambe”, 2019, N2 (14), pp. 176-182.
3. Application of Genetic Algorithm in Common Optimization Problems, International Annals of Science, Volume8, Issue1, pp. 17-21, Jul 2019, DOI: <https://doi.org/10.21467/ias.8.1.17-21>
4. Application of genetic algorithm to solve BAO problem, International Journal of Latest Research in



### **Volume and Structure of Dissertation**

The proposed work comprises 116 printed pages, which includes an introduction, 4 chapters, conclusions and recommendations, a list of used literature and appendices. The first chapter is devoted to an overview of existing optimization methods, a critical assessment based on examples, and a definition of the main research goal. Chapters 2 and 3 are devoted to creating a mathematical model and optimization algorithm, respectively, and Chapter 3 also provides the results of numerical calculations performed to test the algorithm's performance. Chapter 4 is devoted to experimental testing of the obtained model and optimization algorithm on real examples. Recommendations and conclusions are presented at the end of the paper. The appendices show the dosimetric data of several plans created during the software tests.

### **Brief content of dissertation**

**The first chapter** provides an overview of the optimization methods used in engineering. The relevance of the research topic is presented and the scientific works created around the problem are discussed. Examples of engineering optimization problems include the optimization of the vehicle long-wheelbase chassis by the finite element method, the solid body modeling program CATIA, and the simulation and analysis program ANSYS. The problem of optimizing Belgium's energy distribution network using the heuristic algorithm (ACO - Ant Colony Optimization Algorithm) was also discussed, where it is shown how effective the heuristic approaches are for large-scale search tasks.

The objectives of optimization in modern medical engineering, in particular, in the direction of radiation therapy, are briefly discussed. The importance, complexity, and approaches to selecting optimal angles when irradiating with the IMRT (Intensity Modulated Radiation Therapy) technique are shown. In particular, the selection of irradiation angles by simplex and gradient descend methods is discussed, showing the pros and cons of each. Examples of simulated annealing and evolutionary algorithms are discussed. Based on the reviewed material, main goals and objectives of research was defined.

**The second chapter** contains overview of the mathematical models for selecting irradiation angles, basic definitions around the topic, and methods for evaluating the quality indicators of treatment plans. Flexible optimization function was selected:

$$\min_{w \in R^B} f(w) = \sum_n p_n f_n(w)$$

$$c_k^l \leq c_k(w) \leq c_k^u$$

$$0 \leq w$$

Where  $f(w)$  is a main minimization function, consisting of the individual components  $f_n(w)$  multiplied by relative weight  $p_n$ .  $c_k^l$  and  $c_k^u$  represent upper and lower boundaries of  $Ck(w)$  function. Following penalty functions were selected for experimental use:

$$f_{sq \text{ deviation}} = \frac{1}{N_s} \sum_{i \in S} (d_i - \hat{d})^2$$

$$f_{mean} = \frac{1}{N_s} \sum_{i \in S} d_i$$

$$f_{\min DVH} = \frac{1}{N_s} \sum_{i \in S} \theta(\hat{d} - d_i) \theta(d_i - \tilde{d}) (d_i - \hat{d})^2$$

$$f_{\max DVH} = \frac{1}{N_s} \sum_{i \in S} \theta(d_i - \hat{d}) \theta(\tilde{d} - d_i) (d_i - \hat{d})^2$$

where:  $d_i$  - dose value in voxel  $i$

$\hat{d}$  - prescribed dose

$\bar{d}$  - actual dose in voxel

$S$  - structure

$N_s$  - number of voxels in structure  $S$

$\theta(x)$  - Heaviside function

The geometry of irradiated body is also discussed. A rotation matrix has been developed that will allow us to determine the location of any point in the body relative to the irradiation machine moving around the patient. Also, a mathematical apparatus for the exclusion of obviously unusable fields is presented.

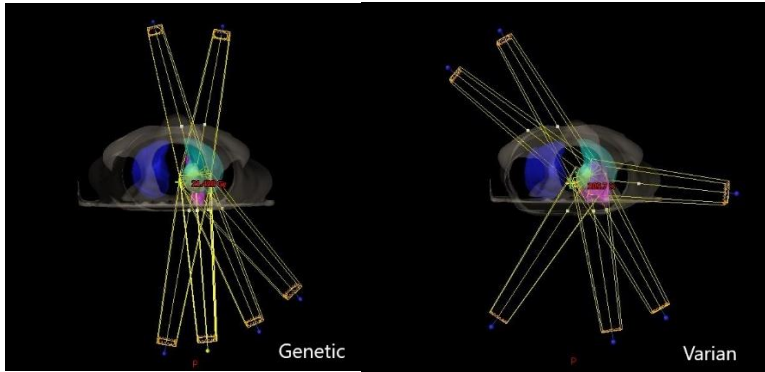
**The third chapter** describes the results of software development and early testing to evaluate the algorithm of our choice. Genetic algorithm has been selected for use in the research process, the main advantage of which compared to the alternatives is the mutation mechanism, which excludes the possibility of sticking to the local minimum. The algorithm was implemented on the basis of the open source treatment planning software MatRad, which includes all the basic libraries necessary to calculate the dose distribution obtained by selected irradiation angles and to process the results. The MATLAB programming language was used to write the software.

Three clinical cases of brain, lung and skin tumors were selected for the experimental evaluation of developed software. Each case was optimized using both our approach and one commonly used commercial software. In all three cases the genetic algorithm gave us a better dose distribution compared to the competitor. Pre-selected quality indicators are also satisfactory for all three cases.

**The fourth chapter** is fully devoted to the experimental testing of the developed optimization method. In particular, calculations were performed for 3 clinical brain cancer cases, 3 lung cancer cases, and 3 clinical cases of lymphoma. For comparison purposes, optimization for the same patients was performed using an alternative, clinically proven computational method. Basic optimization parameters and constraints were kept same for both methods. In each case, the genetic algorithm showed better results compared to the alternative, deterministic method (Fig. 1,2) (Table 1). The calculations revealed that the mutation parameter is working efficiently and does not allow the algorithm to stick to the local minimum, which is a serious problem for the alternative deterministic method. It should be noted that in 3 cases the genetic algorithm used less fields than the competitor to get optimal results, which obviously is a positive indicator.



*Fig. 3 Location of target tissue (Red)*



*Fig. 4 Alignment of fields around the patient given by Genetic and Deterministic (Varian) algorithms*

*Table 2. Dosimetric results of optimizations*

Organs at Risk	Dose Constraint	Actual Dose (Genetic)	Actual Dose (Varian)
Lungs (Bilateral)	Mean < 23 Gy V20 < 35%	Mean = 3.2 Gy V20 = 10%	Mean = 3.5 Gy V20 = 10.1%
Heart	V45 < 67% V60 < 33%	N/A N/A	N/A N/A
Spinal Cord	Max < 50 Gy	Max = 7.3 Gy	Max = 10.9 Gy

## Results and Conclusions

Theoretical and experimental research shows the strengths and weaknesses of the proposed optimization method. The results of the study can be summarized in a few key points:

1. A mathematical model tailored to the task set in the paper has been selected and the optimal combination of penalty parameters to be included in the minimization function has been proposed.
2. An adapted version of the genetic algorithm has been developed for the task of selecting the optimal irradiation parameters.
3. Considering the selected model and algorithm the software has been developed in MATLAB programming language.
4. Experimental testing of the developed system showed acceptable clinical results in all the cases discussed. Among them, an average of 7% improvement (compared to Varian's optimization software) in lung doses, 67% improvement in eye (orbit) doses, 126.5%, and 143% improvement in lens and pituitary doses, respectively.

5. The mutation parameter provided in the genetic algorithm has effectively prevented the local minima entrapment in every discussed case.
6. Optimization time was reduced by an average of 10 times using 12 parallel calculation threads, compared to single threaded calculations.