



## საინჟინრო დიზაინის მიდგომები და ტოპოლოგიის ოპტიმიზაციის ინსტრუმენტების შედარებითი კვლევა

ქეთევან კვესელავა<sup>1</sup>; ირაკლი ბოჭორიშვილი<sup>2</sup>; ლევან ჯიქიძე<sup>3</sup>; ლიანა თედუმვილი<sup>4</sup>; ზურაბ  
სამხარაძე<sup>5</sup>

<sup>1</sup>სტუ-ს ინფორმატიკისა და მართვის სისტემების ფაკულტეტის პროფესორი, სსიპ-დავით აღმაშენებლის სახელობის საქართველოს ეროვნული თავდაცვის აკადემიის მთავარი მეცნიერი, ინფორმატიკის ინჟინერიის აკადემიური დოქტორი Orcid:0000-0002-1318-2750; <sup>2</sup>სტუ-ს ინფორმატიკისა და მართვის სისტემების ფაკულტეტის ასოცირებული პროფესორი Orcid:0009-0006-4165-3149; <sup>3</sup>სტუ-ს ინფორმატიკისა და მართვის სისტემების ფაკულტეტის ასოცირებული პროფესორი; <sup>4</sup>სტუ-ს ინფორმატიკისა და მართვის სისტემების ფაკულტეტის ასოცირებული პროფესორი Orcid:0009-0004-8868-6517; <sup>5</sup>სსიპ-დავით აღმაშენებლის სახელობის საქართველოს ეროვნული თავდაცვის აკადემიის სამეცნიერო კვლევითი ცენტრის მთავარი მეცნიერი, სამხედრო მეცნიერებათა დოქტორი, Orcid:0009-0003-7426-4447

### აბსტრაქტი

ნაშრომში წარმოდგენილია გენერაციული დიზაინის საინჟინრო მიდგომები, ავტორებს აღნიშნული აქვთ, რომ დანამატის წარმოების **AM (Additive Manufacturing)** გამოჩენა ავლენს მიმდინარე კომპიუტერის დამხმარე დიზაინის **CAD (Computer Aided Design)** სისტემების საზღვრებს და, ამავე დროს, ხაზს უსვამს ტოპოლოგიის ოპტიმიზაციას **TO (Topology Optimization)** და გენერაციული დიზაინის **GD (Generative Design)** ინსტრუმენტების პოტენციალს, რომლებიც აქამდე არ იყო სრულად გამოყენებული. დიზაინის ტრადიციული მიდგომისგან განსხვავებით, სადაც დიზაინერები იკავებენ დომინანტურ როლს საინჟინრო დიზაინის პროცესის თითოეულ ეტაპზე, ნაშრომში აღნიშნულია, რომ ასეთი ხელსაწყოების დანერგვა პროდუქტის განვითარების პროცესში, უზიარებს სიმულაციური დიზაინის მიდგომებისკენ, რაც გულისხმობს დიზაინერის როლის მნიშვნელოვან ცვლილებას. ამ მიზნით, ნაშრომში წარმოდგენილია დანამატების წარმოების ორი განსხვავებული დიზაინის მეთოდის შედარება, კერძოდ **TO** და **GD** ინსტრუმენტების გამოყენებით მიღებულ პროდუქტებზე. შედარება მიზნად ისახავს წარმოაჩინოს ასახვა ტრადიციული მიდგომის ევოლუციაზე, როდესაც გამოიყენება **TO** და **GD** ინსტრუმენტები, და გამოკვეთოს ამ ოპტიმიზაციის ხელსაწყოების პოტენციალი და შეზღუდვები **CAD** სისტემებთან ინტეგრირებული სახით მიღებისას.

გარდა ამისა, ეს შედარებითი კვლევა შეიძლება იყოს სასარგებლო და პრაქტიკული წყარო დიზაინერებისთვის, რათა გამოავლინონ ყველაზე შესაფერისი მიდგომა მათი საჭიროებებისა და პროექტის რესურსებიდან გამომდინარე.

შედარებითი კვლევა ტარდება **Formula Student** საბოლოო მანქანისთვის როკერის მკლავისა და სამუხრუჭე პედლის პროტოტიპის დიზაინის შესწავლით. მათი შედეგები, მექანიკური შესრულების თვალსაზრისით, გვიჩვენებს, რომ **TO** და განსაკუთრებით **GD** ხელსაწყოები შეიძლება ეფექტურად იქნას გამოყენებული ადრეულ ეტაპზე დიზაინის პროცესში, რომელიც ორიენტირებულია **AM**-ზე, რათა შეცვალონ კომპონენტები და ისინი გახადონ უფრო მსუბუქი და ძლიერი.

**საკვანძო სიტყვები:** დანამატების წარმოება, ტოპოლოგიის ოპტიმიზაცია, გენერაციული დიზაინი, CAD სისტემები, საინჟინრო დიზაინის მიდგომები.

## შესავალი

დანამატის წარმოებამ **AM** შემოიტანა რადიკალური ინოვაციები ტექნოლოგიურ სფეროში პროდუქციის წარმოებისთვის და, ამავე დროს, იგი წარმოადგენს რევოლუციას სამრეწველო დიზაინისა და პროდუქტის განვითარების სფეროებში, რადგან ის ინჟინრებს აიძულებს რადიკალურად გადახედონ დიზაინის მიდგომას, კერძოდ კი კომპიუტერის დამხმარე დიზაინის **CAD** სისტემების მოდელირების აქტივობებს. ფაქტობრივად, **CAD** სისტემები შემუშავებულია და მუდმივად იხვეწება, რათა უზრუნველყოს პროდუქციის დამზადების შესაძლებლობა ჩვეულებრივი გამოკლების ტექნიკის საშუალებით, რაც გულისხმობს მასალის თანდათანობით ამოღებას საწყისი მოცულობიდან სასურველი საბოლოო ფორმის მისაღებად.

**AM**-ის გამოჩენა ავლენს მიმდინარე **CAD** სისტემების საზღვრებს და, ამავე დროს, ხაზს უსვამს ტოპოლოგიის ოპტიმიზაციის **TO** და გენერაციული დიზაინის **GD** ინსტრუმენტების პოტენციალებს, რომლებიც აქამდე სრულად არ იყო გამოყენებული.

**AM** მართლაც გამაძლიერებელი ტექნოლოგიაა, რომელსაც შეუძლია ამ ოპტიმიზაციის ხელსაწყოების შედეგის გაცოცხლება, რაც ძალიან რთული გეომეტრიების დამზადების საშუალებას იძლევა. ფაქტობრივად, ჩვეულებრივი დიზაინის მიდგომასთან შედარებით, ოპტიმიზაციის ხელსაწყოების და **AM** ტექნოლოგიების ინტეგრირებული გამოყენება საშუალებას იძლევა უფრო მსუბუქი, მაგრამ უფრო ძლიერი ნაწილების წარმოებას რთული ორგანული ფორმებით, მყარი შევსების ნაცვლად.<sup>1</sup> გარდა ამისა, დიზაინერს ენიჭება თავისუფლება, რათა მოახდინოს პროდუქტის მოდელირება ან გადაკეთება, რომელიც ოპტიმიზირებულია კონკრეტული აპლიკაციისთვის, ნაწილების სტანდარტიზაციისათვის ან ტრადიციულად შეზღუდული გეომეტრიებისთვის.<sup>2</sup>

მიუხედავად იმისა, რომ ეს არის შედარებით უახლესი ტექნოლოგია, რომელიც შეიქმნა 80-იან წლებში და გამოჩნდა 90-იან წლებში, **AM** სისტემა თავიდანვე იყო მხოლოდ პროტოტიპების დამზადებისთვის, სამაგიეროდ, ახლა იგი გამოიყენება საოპერაციო

<sup>1</sup> Y.Tang, Y.F.Zhao, „A survey of the design methods for Additive Manufacturing to improve functional performance“, Rapid Prototyp. J. 2016, 22, 569–590.

<sup>2</sup> A. Wiberg, J. Persson, J. Ölvander, „Design for Additive Manufacturing—A review of available design methods and software“, Rapid Prototyp. J. 2019, 25, 1080–1094.

ნაწილების საწარმოებლად მრავალ ინდუსტრიულ დარგში, როგორებიცაა: აერონავტიკა, ავტომობილები, სამედიცინო და სამომხმარებლო პროდუქტები.<sup>3</sup> აქედან გამომდინარე, აშკარაა, თუ რამდენად აუცილებელი და გადაუდებელია ამჟამინდელი CAD სისტემების შესაძლებლობებისა და ფუნქციონალების გაფართოება, TO და GD ინსტრუმენტების კიდევ უფრო მარტივი და ეფექტური ინტეგრაციის ხელშეწყობა და წახალისება. გარდა ამისა, AM ტექნოლოგიები უფრო დიდ მნიშვნელობას ანიჭებენ და ხელს უწყობენ კონცეფციისა და მოდელირების დიზაინის ეტაპებს, ვიდრე მხოლოდ დადასტურებას ოპტიმიზაციისთვის.

ამ მოსაზრებებიდან გამომდინარე, ნაშრომში წარმოდგენილია დანამატების წარმოების ორი განსხვავებული დიზაინის მეთოდის შედარება, გენერაციული დიზაინისა და ტოპოლოგიის ოპტიმიზაციის ინსტრუმენტების გამოყენებაზე დაყრდნობით. შედარება ხორციელდება **Formula Student** -ის სარბოლო მანქანისთვის როკერის მკლავისა და სამუხრუჭე პედლის პროტოტიპის დიზაინის შესწავლის გზით, რაც საშუალებას იძლევა ამ ოპტიმიზაციის ხელსაწყოების პოტენციალის CAD სისტემასთან ინტეგრირებული ფორმით მიღებისას. ნაშრომი ასევე იძლევა პრაქტიკულ და სასარგებლო ინფორმაციას დიზაინერების მუშაობის მხარდასაჭერად TO და GD ინსტრუმენტების გამოყენებაზე და თუ როგორ ზემოქმედებენ ისინი დიზაინის პროცესზე.

## 2. TO და GD ინსტრუმენტებზე დაფუძნებული დიზაინის მეთოდები

ჩვეულებრივი საინჟინრო დიზაინის მიდგომის მიხედვით, პროცესი იწყება კონცეპტუალურ ეტაპზე ფუნქციური სპეციფიკაციების შემუშავებით, მომხმარებლის საჭიროებებზე, რომლებიც მიიღება შემდგომ მოდელირების ეტაპზე, რათა გარდაიქმნან გეომეტრიულ ფორმებად CAD სისტემის საშუალებით. კერძოდ, CAD სისტემა გამოიყენება საბოლოო ობიექტის დეტალური 3D წარმოდგენისა და ზუსტი ტექნიკური ნახაზების შესაქმნელად. სამგანზომილებიანი მოდელები ვალიდირებულია სიმულაციური ხელსაწყოებით, მაგ. კომპიუტერული დამხმარე ინჟინერიის CAE (**Computer Aided Engineering**) და კომპიუტერული დამხმარე წარმოების CAM (**Computer Aided Manufacturing**) ინსტრუმენტებით, ანალიზისა და ტესტირების აქტივობების მეშვეობით. ასეთი მიდგომის გამოყენებით, თუ ერთის მხრივ, კომპიუტერული დამხმარე ტექნოლოგიების CAx (**Computer Aided Technologies**) სისტემები მხარს უჭერენ და ამარტივებენ დიზაინერების სამუშაოებს, მეორე მხრივ, მათ შეუძლიათ გავლენა მოახდინონ დიზაინის პროცესზე და შეზღუდონ მათი კრეატიულობა.<sup>4</sup> ეს ძირითადად იმიტომ ხდება, რომ ამჟამინდელი CAD სისტემები დიზაინერებს საშუალებას აძლევენ შექმნან 3D მოდელები, ფუნქციებზე დაფუძნებული პარამეტრული მოდელირების მიდგომის მიხედვით, რომელიც დაინერგა 1980-იანი წლების ბოლოს.

ამ ტექნიკის მთავარი უპირატესობა იყო მისი შესაძლებლობებით, დიზაინის ცვლადებითა და პარამეტრული მახასიათებლებით განსაზღვრული მოქნილი დიზაინის

<sup>3</sup> J.-P. Kruth, M.C. Leu, T. Nakagawa, „Progress in Additive Manufacturing and Rapid Prototyping“, CIRP Ann. Manuf. Technol. 1998, 47, 525–540.

<sup>4</sup> L. Barbieri, F. Calzone, M. Muzzupappa, „Form and function: Functional optimization and Additive Manufacturing. In Advances on Mechanics, Design Engineering and Manufacturing II“, Springer: Cham, Switzerland, 2019; pp. 649–658.

წარმოება, რომელიც განისაზღვრება მისი დიზაინის ცვლადებითა და პარამეტრული მახასიათებლებით. მომდევნო წლებში, CAD სისტემები გამდიდრდა შემდგომი მოდელირების ფუნქციებითა და სპეციფიკური მახასიათებლებით, იგი ინტეგრირებულ იქნა CAE და CAM მოდულებთან, რათა ინჟინრებს საშუალება მისცემოდათ, რომ ემუშავათ ერთიან გარემოში. კერძოდ, CAE მოდულების სასრული ელემენტების ანალიზი FEA (Finite Element Analysis) შეასრულების საშუალებას იძლევა, რომელშიც სტრუქტურული პრობლემები წყდება გეომეტრიის, სასაზღვრო პირობების და საწყისი პირობების განსაზღვრით, ხოლო CAM გამოიყენება CAD ნაწილში შექმნილი გეომეტრიის წარმოების შესაფასებლად. როდესაც ხელსაწყოები და ხელსაწყოების ნაკრებები აღმოჩნდება დამაკმაყოფილებელი, შეიძლება შეიქმნას კომპიუტერული რიცხვითი კონტროლი CNC (computer numerical control) -ის კოდი და მისი გამოყენება შესაძლებელია რეალურ აპარატში გეომეტრიული პროდუქტის დასამზადებლად, თუ მანქანის CNC-კოდერი დანერგულია CAD/CAM პროგრამულ უზრუნველყოფაში.<sup>5</sup> მიუხედავად ამისა, მოდელირების მიდგომა არსებითად უცვლელი რჩება, იგი ვერ ახერხებს დიზაინერების მხარდაჭერას რთული გეომეტრიის და მაღალი ფუნქციონალური მოდელების შესაქმნელად.

AM-ის გამოჩენამ კი გაანადგურა გამოკლებითი წარმოების ტექნოლოგიური შეზღუდვები და, შესაბამისად, მან დიზაინერებს შესთავაზა უზარმაზარი პოტენციალი გეომეტრიების რეალიზაციისთვის, რომლის მიღწევაც რამდენიმე წლის წინ შეუძლებელი იყო. ამ პოტენციალების შესახებ მზარდი ცნობიერების მიუხედავად, როგორც ზემოთ ავლნიშნეთ, ამჟამინდელი CAD სისტემები არ აძლევს ინჟინერებსა და დიზაინერებს მათი სრულად გამოყენების საშუალებას. ეს იმიტომ ხდება, რომ დიზაინერებმა და ინჟინერის დიზაინერებმა უნდა შეცვალონ წარმოების ჩვეულებრივი მეთოდებისთვის ჩაფიქრებული მახასიათებლები ძალიან რთული გეომეტრიების შესაქმნელად. სინამდვილეში, CAD სისტემები იყენებენ იმავე ტერმინოლოგიას ამ მახასიათებლებისათვის, რაც გამოიყენება წარმოებასა და დიზაინში. ეს მახასიათებლები ეხება სპეციფიკურ ჩვეულებრივ წარმოების პროცესებს, რომლებიც შემუშავებულია მათ ეფექტურად ჩამოყალიბებისთვის. აქედან გამომდინარე, ნათელია, რომ CAD ფუნქციონციების გამოყენება AM-ზე ორიენტირებული დიზაინისთვის არის დამღლევი და შრომატევადი აქტივობა, რომლის შედეგი დიდწილად დამოკიდებულია მოდელირების ინდივიდუალურ უნარებსა და გამოცდილებაზე.<sup>6</sup> ამ კონტექსტში აშკარაა, რომ TO და GD ინსტრუმენტების დახმარება შეიძლება იყოს ეფექტური და სასარგებლო არა მხოლოდ ანალიზისა და ოპტიმიზაციისთვის, არამედ განსაკუთრებით ინჟინრების მხარდასაჭერად, კონცეპტუალურ და მოდელირების ეტაპებზე, რომლებიც განსაზღვრავენ 3D მოდელების გეომეტრიას.

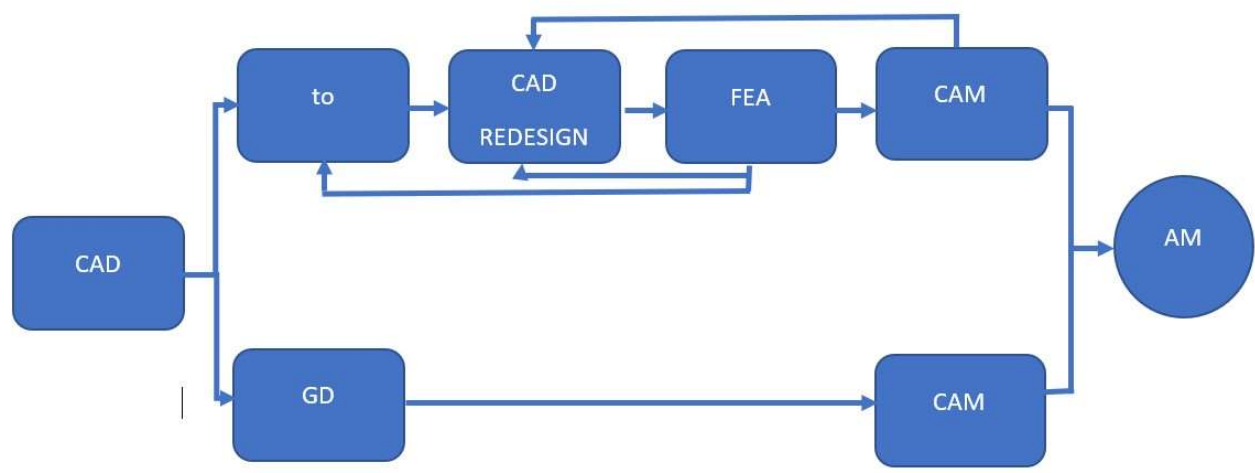
დიზაინის ტრადიციული მიდგომისგან განსხვავებით, რომელშიც CAD სისტემები მიიღება დეტალური გეომეტრიის შესაქმნელად, მიჰყვება დიზაინერის მითითებებს, ხოლო ტოპოლოგიური ოპტიმიზაცია (TO) და GD ინსტრუმენტების დანერგვა დიზაინერებს საშუალებას აძლევს, პირველ რიგში ფოკუსირება მოახდინონ ფუნქციაზე, ნაცვლად ფორმაზე

<sup>5</sup> M. Sandberg, „Design for Manufacturing: Methods and Applications Using Knowledge Engineering“, Ph.D. Dissertation, Luleå Tekniska Universitet, Luleå, Sweden, 2007.

<sup>6</sup> M.K. Thompson, G. Moroni, T. Vaneker, G. Fadel, R.I. Campbell, I. Gibson, A. Bernard, J. Schulz, P. Graf, B. Ahuja, et al. „Design for Additive Manufacturing: Trends, opportunities, considerations, and constraints“, CIRP Ann. 2016, 65, 737–760.

დიზაინის ალტერნატივების შესაქმნელად. ფაქტობრივად, როგორც ნაჩვენებია სურათში 1. პირველი ეტაპი, რომელიც საერთოა ორივე მიდგომისთვის, უზრუნველყოფს CAD სისტემის მიღებას, მაგრამ მხოლოდ ფუნქციური ზედაპირების განსაზღვრისათვის. გარდა ამისა, ბოლო ეტაპი საერთოა ორივე მიდგომისთვის და მოიცავს CAM სისტემების გამოყენებას სწორი წარმოების უზრუნველსაყოფად.

ზემოთაღნიშნული CAM სისტემებისგან განსხვავებით, ეს სისტემები, სპეციფიკურია AM-ისთვის, რომელიც მიღებულია ბეჭდვის შესაძლებლობების მაქსიმალურად გაზრდის მიზნით, ნაწილის ორიენტაციის ოპტიმიზაციისთვის, საყრდენების რაოდენობისათვის და ტიპისთვის, ბეჭდვის დროს მაღალი გრადიენტის დროს წარმოქმნილი ნაწილის დეფორმაციების პროგნოზირებისთვის.<sup>7</sup> იმ შემთხვევებში, როდესაც თერმული ანალიზი გამოავლენს გეომეტრიულ დამახინჯებებს, გეომეტრიული კომპენსაცია შეიძლება გამოყენებულ იქნას დიზაინზე წინასწარ დეფორმირებული ნაწილების დასაბეჭდად, რათა მივიღოთ ნომინალური გეომეტრიული ტოლერანტობა საყრდენის ამოღების შემდეგ. ორივე მიდგომაში, TO ან GD ინსტრუმენტების გამოყენებით, მას შემდეგ, რაც პროდუქტი მზადდება AM ტექნიკის გამოყენებით, წარმოების პროცესი მთავრდება თერმული დამუშავების ჩვეულებრივი შემდგომი დამუშავებით, მზა ნაწილის ფირფიტიდან საყრდენების მოხსნით, ზედაპირის დასრულება ხდება ლაზერული გაპრიალებით. CNC- ის დამუშავების ოპერაციები შესაძლოა ასევე საჭირო გახდეს ფუნქციური ზედაპირების გეომეტრიული განზომილების და ტოლერანტობის მოთხოვნების დახვეწის დასაკმაყოფილებლად.



სურათი 1. საინჟინრო დიზაინის მეთოდები TO და GD ინსტრუმენტების დანერგვით.

### 2.1 ტოპოლოგიური ოპტიმიზაცია

TO-ია არის გამოთვლითი დიზაინის მეთოდოლოგია, რომელიც სასრული ელემენტების ანალიზის გამოყენებით საშუალებას იძლევა შევქმნათ მასალის ოპტიმალური განლაგება დიზაინის საგანში, მოცემული შეზღუდვების, დატვირთვისა და სასაზღვრო პირობების დაცვით. კერძოდ, დიზაინის საგანი დისკრეტიზებულია სასრულ ელემენტებად და ოპტიმიზაციის ტექნიკიდან ერთ-ერთი გამოიყენება მასალის განაწილების დასადგენად. ეს ჩვეულებრივ მიიღწევა მასის მინიმიზაციის გზით, ხოლო მასის თავიდან აცილების ან

<sup>7</sup> M. Pagac, J. Hajnys, R. Halama, T. Aldabash, J. Mesicek, L. Jancar, J. Jansa, „Prediction of Model Distortion by FEM in 3D Printing via the Selective Laser Melting of Stainless Steel AISI 316L“, Appl. Sci. 2021, 11, 1656.

სიხისტის მაქსიმალური გაზრდისას, ზღუდავს მასას სამიზნე მნიშვნელობამდე. **TO**-ამ სწრაფი ზრდა განიცადა 1990-იანი წლების დასაწყისში, რადგან მას ადვილად განასხვავებენ ფორმების ან ზომის ოპტიმიზაციის კონცეფციებისგან.<sup>8</sup> მომდევნო წლებში, **TO** ინსტრუმენტები სწრაფად განვითარდა აკადემიურიდან ინდუსტრიულ სფერომდე, ფაქტობრივად, ისინი ეფექტურად გამოიყენება სხვადასხვა სფეროში და ყოველდღიურ ინდუსტრიაში.

პრაქტიკაში, ის ხშირად გამოიყენება უკვე არსებული პროდუქტების ხელახალი დიზაინისთვის.<sup>9</sup> ახლახან, **CAD** სისტემების ევოლუციისა და დანამატების ტექნოლოგიების მიმზიდველობის წყალობით, სხვადასხვა პროგრამული უზრუნველყოფების შემქმნებლებმა დაიწყეს **TO** მოდულების ინტეგრირება მოდელირების გარემოში. ეს საჭიროება წარმოიქმნება ამ ოპტიმიზაციის პროცესის ლიმიტიდან, რომელიც ნაჩვენებია სურათზე 1, მოითხოვს ხელახალი დიზაინის ფაზას საწარმოო დიზაინის მისაღწევად ან უბრალოდ მცირე ცვლილებების შესატანად გეომეტრიაში. რედიზაინის ეს ეტაპი იწვევს არა მხოლოდ პროდუქტის ნაწილის მასის დასრულების ზრდას, არამედ დიზაინის დამუშავების დროის ზრდასაც. ეს საკითხი განპირობებულია იმით, რომ **TO** მოითხოვს სასრული ელემენტების მოდელს და მისი შედეგები წარმოდგენილია ტესელაციის\* მოდელის გამოყენებით, რომელიც არ შეიძლება პირდაპირ გარდაიქმნას პარამეტრულ **CAD** ნაწილად და, გარდა ამისა, მისი მანიპულირება არ შეიძლება პირდაპირ **CAD** სისტემებში, განსაკუთრებით მაშინ, როდესაც ბადე ძალიან მკვრივია. ამ მიმართულებით განხორციელებული სხვადასხვა მცდელობისა და ძალისხმევის მიუხედავად, ყველა მათგანს აკლია ეფექტური ინტეგრაცია **TO** ინსტრუმენტებსა და **CAD** სისტემებს შორის.<sup>11</sup> ამ მიზეზით, ბოლო ათწლეულში, შემოთავაზებული იქნა სხვადასხვა სახელმძღვანელო და ნახევრად ავტომატური მეთოდები, რათა ხელი შეუწყონ დიზაინერებს ტოპოლოგიის ოპტიმიზაციის შედეგების ინტერპრეტაციაში და პარამეტრულ **CAD** მოდელად კონვერტაციაში.<sup>12</sup> ცოტა ხნის წინ, ზოგიერთმა **CAD** სისტემამ უზრუნველყო ფუნქციები, რომლებიც მოქმედებენ უშუალოდ ტოპოლოგიური ოპტიმიზაციის ანალიზის შედეგებზე. ეს არის ძირითადად სკულპტურის და თავისუფალი ფორმის მოდელირების ხელსაწყოები, რომლებსაც მექანიკური ინჟინრები ნაკლებად არიან მიჩვეულები, ვიდრე ტრადიციულ მახასიათებლებზე დაფუძნებული მოდელირების მიდგომა. შედეგად, ყოველდღიურ სამრეწველო პრაქტიკაში, ინჟინრები და დიზაინერები ასრულებენ **TO** შედეგების რემოდელირებას, რაც აუცილებელია საწარმოო მახასიათებლებზე დაფუძნებული გეომეტრიის მისაღწევად. უმეტეს შემთხვევაში, პროცედურა ხორციელდება ხელით, მხოლოდ ნაწილის მოდელირება ხდება **CAD** გარემოში,

<sup>8</sup> Ribeiro, T.; Bernardo, L.; Andrade, J. Topology Optimisation in Structural Steel Design for Additive Manufacturing. Appl. Sci. 2021, 11, 2112.

<sup>9</sup> Hällgren, S.; Pejryd, L.; Ekengren, J. (Re)Design for Additive Manufacturing. Procedia CIRP 2016, 50, 246–251.

\*მოპირკეთება კრამიტის ან ზედაპირის, ხშირად სიბრტყის საფარის, ერთი ან მეტი გეომეტრიული ფორმის გამოყენებით, რომელსაც ეწოდება ფილები, გადახურვისა და ხარვეზების გარეშე. მათემატიკაში ტესელაცია შეიძლება განზოგადდეს უფრო მაღალ განზომილებებზე და მრავალფეროვან გეომეტრიაზე.

<sup>11</sup> C. Lindemann, T. Reiher, U. Jahnke, R. Koch, „Towards a sustainable and economic selection of part candidates for Additive Manufacturing“, Rapid Prototyp. J. 2015, 21, 216–227

<sup>12</sup> L. Jiu, W. Zhang, L. Meng, Y. Zhou, L. Chen, „A CAD-oriented structural topology optimization method“, Comput. Struct. 2020, 239, 106324.

რომელიც იყენებს ბადეს, როგორც მითითებების მოდელირებისას.<sup>13</sup> როგორც ნაჩვენებია სურათზე 1, დიზაინის პროცესი იწყება მარტივი გეომეტრიით, რომელიც განსაზღვრავს დიზაინის სივრცეს და ფუნქციურ ზედაპირებს. შემდეგ, **3D** მოდელი იმპორტირებულია **TO** გარემოში, რომელშიც, დატვირთვებისა და შეზღუდვების გარდა, ასევე უნდა განისაზღვროს ობიექტური ფუნქციები, რომლებიც ჩვეულებრივ გამოიხატება მინიმიზაციის ან მაქსიმიზაციის თვალსაზრისით, მოცემული დიზაინის პარამეტრებისთვის.

ამ ფაზის შემდეგ, სიმულაცია შეიძლება დაიწყოს და ამომხსნელი წარმოქმნის ოპტიმიზებულ გეომეტრიას. ტოპოლოგიური ოპტიმიზაციის ამომხსნელი არის ოპტიმიზაციის ალგორითმი. ამ კონტექსტში, ამაჟამად გამოიყენება რამდენიმე სახის ალგორითმები, რომლებიც შეიძლება კლასიფიცირდეს დეტერმინისტულ და სტოქასტურ ალგორითმებად.

ყველაზე ხშირად ხელმისაწვდომი კომერციული პროგრამული უზრუნველყოფა ახორციელებს **TO** ანალიზს გრადიენტზე დაფუძნებული სიმკვრივის მიდგომის გამოყენებით, რომელიც ხასიათდება დიზაინის ცვლადით, იგი მერყეობს 0-დან 1-მდე (მყარი მასალა), მინიჭებულ დისკრეტულ ელემენტებზე, რომლებიც წარმოადგენენ მასალის ხელოვნურ სიმკვრივეს.<sup>14</sup> გამოსავალი მოიძებნება განმეორებითი პროცესის მეშვეობით, რომელსაც ეწოდება **წყობილი ფორმულირება**.<sup>15</sup> შემდეგ ეტაპზე, დიზაინერის სამუშაოა ხელახალი დიზაინი მასალის ამოღებით, სადაც ეს შესაძლებელია, ტოპოლოგიის ანალიზის შედეგების მიხედვით.

შემდეგ, რედიზაინის ეტაპზე, დიზაინერი ქმნის მახასიათებლებზე დაფუძნებულ გეომეტრიას, რომელიც შეესაბამება თეორიულად ოპტიმალურ გეომეტრიას, იგი მოწოდებულია **TO** ინსტრუმენტით, მაგრამ ამავე დროს, ის ასევე აკმაყოფილებს ტექნოლოგიურ შეზღუდვებს. შემდეგ **CAD** მოდელი მიიღება სიმულაციური ექსპერტის მიერ, რათა განახორციელოს **FEA** და **CAM** ვალიდაცია, განმეორებითი პროცესის მეშვეობით, სანამ გაგრძელდება მისი გადამუშავება დანამატების წარმოების ტექნოლოგიების გამოყენებით.

## 2.2. გენერაციული დიზაინი

GD ინსტრუმენტები იყენებენ ხელოვნურ ინტელექტზე დაფუძნებულ ალგორითმებს, რათა შექმნან დიზაინის ვარიანტების მთელი რიგი, რომლებიც აკმაყოფილებენ წინასწარ განსაზღვრულ კრიტერიუმებს, მომხმარებლის საწყისი პრეფერენციების საფუძველზე, როგორცაა: მასალები, დიზაინის სივრცე და ფუნქციონალური ზედაპირები, შესრულების მოთხოვნები და წარმოების შეზღუდვები.<sup>16</sup> კერძოდ, მათ შეუძლიათ შექმნან მრავალი

<sup>13</sup> S. Rosso, F. Uriati, L. Grigolato, R. Meneghello, G. Concheri, G. Savio, „An Optimization Workflow in Design for Additive Manufacturing“, Appl. Sci. 2021, 11, 2572.

<sup>14</sup> O. Sigmund, „On the usefulness of non-gradient approaches in topology optimization“, Struct. Multidiscip. Optim. 2011, 43, 589–596.

<sup>15</sup> M.P. Bendsøe, O. Sigmund, „Material interpolation schemes in topology optimization“, Arch. Appl. Mech. 1999, 69, 635–654

<sup>16</sup> H. Sun, L. Ma, „Generative Design by Using Exploration Approaches of Reinforcement Learning in Density-Based Structural Topology Optimization“, Designs 2020, 4, 10.

განსხვავებული დიზაინური გადაწყვეტილებები, რომლებსაც დიზაინერი ვერასოდეს მოიფიქრებდა უკეთესი შესრულებით, ვიდრე ტრადიციული მეთოდებით შემუშავებულ კომპონენტთან შედარებით მასის შემცირების, სიმტკიცის გაუმჯობესებისა და შეკრების ნაწილების რაოდენობის შემცირების თვალსაზრისით.

გენერაციული დიზაინის კვლევა დაიწყო 70-იანი წლების დასაწყისში, როდესაც შეიქმნა პირველი დიზაინის ალგორითმები, რომლებიც ბუნების მიბაძვას ახდენდნენ. შემდეგ, პარამეტრული CAD ინსტრუმენტების მოსვლასთან ერთად, GD დიზაინი უფრო პრაქტიკული მიდგომით იქნა შესწავლილი, მაგრამ იგი გამოიყენეს მხოლოდ მე-20 საუკუნის ბოლოს და 21-ე საუკუნის პირველ ათწლეულში, როდესაც გაკეთდა პირველი მცდელობები GD-ს გამოყენების აკადემიურ კვლევებში და არქიტექტურულ სფეროებში.<sup>17</sup> ბოლო დროს, გამოთვლითი სიმძლავრის მნიშვნელოვანი ზრდის წყალობით, გენერაციული მეთოდების გამოყენება დაიწყო პროდუქტების დიზაინში.<sup>18</sup> ეს გამოწვეულია იმით, რომ ბოლო წლებში გენერაციული პროგრამული უზრუნველყოფა გამოჩნდა ბაზარზე, როგორც დანამატი მოდული CAD სისტემებისთვის, იგი ეხმარება დიზაინერებს შექმნან უფრო ეფექტური დიზაინები, რომლებიც უფრო მსუბუქი, ძლიერი და ზოგიერთ შემთხვევაში, კი უფრო მხატვრული იქნება. ფაქტობრივად, დღესდღეობით, უფრო და უფრო მეტი ინდუსტრიული მწარმოებელი კომპანია იწყებს ექსპერიმენტებს ასეთი ხელსაწყოების გამოყენებით პროდუქციის ხელახალი დიზაინის ან ახალი კონცეფციების შესაქმნელად, რომლებიც გადამუშავებულია დიზაინერების მიერ. ამ სახით, მთავარი მაგალითია ფილიპ სტარკის A.I. სკამი Kartell-ისთვის, იგი გამოჩნდა 2019 წელს მილანში Salone del Mobile-ის დროს, რომელშიც GD ტექნოლოგია მიღებულ იქნა თანამემკმნელის როლში, დიზაინერის მიერ მოწოდებული ისეთი პარამეტრების მიხედვით, როგორცაა: მასალები, წარმოების მეთოდები, ხარჯების შეზღუდვები, გენერირებული დიზაინის ალტერნატივები.

როგორც ნაჩვენებია სურათზე 1, დიზაინის პროცესი იწყება CAD სისტემის გამოყენებით, რათა შეიქმნას საწყისი ფორმა და დაბრკოლების გეომეტრია. შემდეგ მომხმარებელი აწვდის ფუნქციურ სპეციფიკაციას, მათ შორის მასალას, ფუნქციურ ზედაპირებს, რომლებიც დაკავშირებულია მექანიკურ ჩარევებთან, დატვირთვებთან, შეზღუდვებთან და სასურველ საწარმოო პროცესებთან, როგორცაა ჩამოსხმა, დამუშავება და დანამატების წარმოება. ოპერატორი ასევე განსაზღვრავს სასურველ სამიზნეს, როგორცაა წონის შემცირება ან სიხისტის მაქსიმალური გაზრდა. CAD სისტემის ინსტრუმენტი ციკლურად მოძრაობს დადგენილ დიზაინის სივრცეში, რათა შექმნას ოპტიმიზებული და დადასტურებული კონცეფციის ფორმების სიმრავლე. ეს შეიძლება დასრულდეს გენეტიკური ალგორითმებისა და ნეირონული ქსელების გამოყენებით. ეს ალგორითმები დაფუძნებულია მანქანური სწავლების ტექნიკაზე ხელოვნური ინტელექტის მომზადებისთვის, რის გამოც ნეირონული ქსელი ერთდროულად ემსახურება ასისტენტს, როგორც ოპტიმიზებული პროდუქტის მათემატიკური მოდელის მშენებლობაში, ასევე მისი ინტერპრეტაციის პროცესში, მაგალითად, წარმოების პარამეტრებში. ამ ფაზაში უპირატესობა ის არის, რომ

<sup>17</sup> A. Chaszar, S.C. Joyce, „Generating freedom: Questions of flexibility in digital design and architectural computation“, Int. J. Arch. Comput. 2016, 14, 167–181

<sup>18</sup> F. Buonamici, M. Carfagni, R. Furferi, Y. Volpe, „Governi, L. Generative Design: An Explorative Study“, Comput. Aided Des. Appl. 2020, 18, 144–155



სიმულაციები სრულდება ღრუბელზე დაფუძნებულ სისტემაზე, ასე რომ, მიუხედავად კომპიუტერის მიერ შესრულებული დიზაინისა, შეიძლება ჩატარდეს მოთხოვნილი GD კვლევები. ამის შემდეგ მიღებული შედეგების ნახვა უძლია დიზაინერს. აქ, GD ინსტრუმენტი მხარს უჭერს დიზაინერებს მათი კვლევისთვის საუკეთესო კონცეფციის იდენტიფიცირებაში, რაც საშუალებას აძლევს მათ განახორციელონ შედარება და ურთიერთგაცვლითი კვლევები სასურველი ძირითადი შესრულების ინდიკატორების საფუძველზე. შემდეგ დიზაინერს შეუძლია აირჩიოს ყველაზე შესაფერისი გადაწყვეტა და დაადასტუროს გეომეტრია CAM ხელსაწყოს მეშვეობით, სანამ წარმოებას გააგრძელებს. შედეგი ოპტიმიზაციის პროცესის შეიძლება იყოს პირდაპირ პროტოტიპირება AM ტექნოლოგიების საშუალებით. მიუხედავად ამისა, გეომეტრია შეიძლება შეიცვალოს ჩაშენებული მოდელირების ხელსაწყოების საშუალებით, რომლებიც საშუალებას იძლევა მანიპულირება მოახდინონ საკონტროლო წერტილებით ან განისაზღვროს კვეთის პროფილები და შეცვალონ გეომეტრია უფრო შესაბამისი გადაწყვეტილებების შესაქმნელად.<sup>19</sup>

### 3. შემთხვევის შესწავლა

შემთხვევის შესწავლა ეხება **Formula Student** სარბოლო მანქანის ორ მექანიკურ კომპონენტს, ეს მექანიკური კომპონენტები მხედველობაში იქნა მიღებული რედიზაინის შესასრულებლად, **TO** და **GD** ინსტრუმენტების გამოყენებით, უფრო ეფექტური კომპონენტების რეალიზების მიზნით. ამ მიზნით, დიზაინი ორიენტირებული იყო კომპონენტების შექმნაზე, რომლებიც უფრო რთული და მსუბუქია, ვიდრე ტრადიციული დიზაინის მიდგომის გამოყენებით. გარდა ერგალის-ალუმინის შენადნობის 7075-T6-ისა (სიმკვრივე 2,81 გ/სმ<sup>3</sup>; იანგის მოდული 71,70 გპა; პუასონის კოეფიციენტი 0,33; გამოსავლიანობა 505 მპა; დაჭიმვის სიმტკიცე 570 მპა), რომელიც მიღებული იყო ტრადიციული კომპონენტების წარმოებისთვის, ასევე გათვალისწინებული იყო ტიტანის Ti6 (სიმკვრივე 4,43 გ/სმ<sup>3</sup>; იანგის მოდული 113,76 გპა; პუასონის კოეფიციენტი 0,35; გამოსავლიანობა 945 მპა; დაჭიმვის სიმტკიცე 1055 მპა). პროგრამული უზრუნველყოფა, რომელიც გამოიყენებოდა მოდელირების, ოპტიმიზაციისა და გენერაციული დიზაინის ანალიზებისთვის იყო Autodesk Fusion 360®.<sup>20</sup>

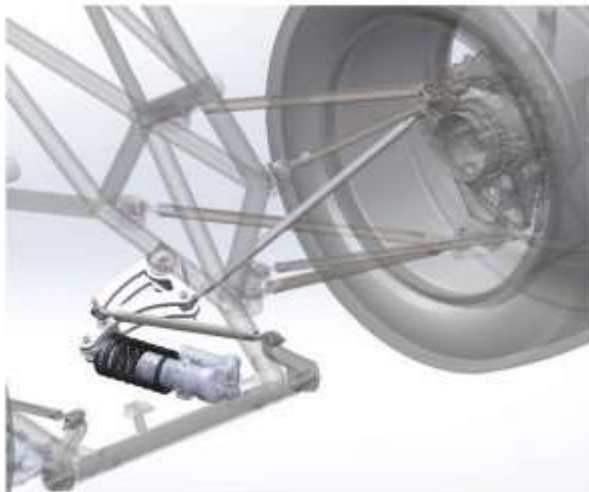
#### 3.1. Rocker Arm საქანელა- მკლავი

პირველი შემთხვევის შესწავლა იყო როკერის მკლავის რედიზაინი, რომელიც დამონტაჟებულია Formula SAE-სთვის შემუშავებულ სარბოლო მანქანაზე (სურათი 2). კერძოდ, სურათი 2 გვიჩვენებს, რომ მარჯვენა უკანა როკერის ასამბლეა, რომელიც ასევე ცნობილია, როგორც ზარის ამწე ან დამაკავშირებელი, მდებარეობს შასის დაბლა და დაკავშირებულია ბორბლის ზედა მხარესთან, სადაც ზედა საკიდის მკლავები ხვდება ვერტკალურ მხარეს. როკერი ასევე აყენებს ანტიროლის ზოლს. ამ კომპონენტის ფუნქციაა

<sup>19</sup> M. arinov, M. Amagliani, T. Barback, J. Flower, S. Barley, S. Furuta, P. Charrot, I. Henley, N. Santhanam, G.T. Finnigan, et al. „Generative Design Conversion to Editable and Watertight Boundary Representation“, CAD Comput. A

<sup>20</sup> Autodesk Fusion 360. Available online: <https://www.autodesk.com/products/fusion-360> (accessed on 11 February 2022).

გადაიტანოს მოზიდვის ღეროს მოძრაობა მბრუნავ ძალაში და ზევით/ქვევით მოძრაობის შეჩერების სისტემაზე.

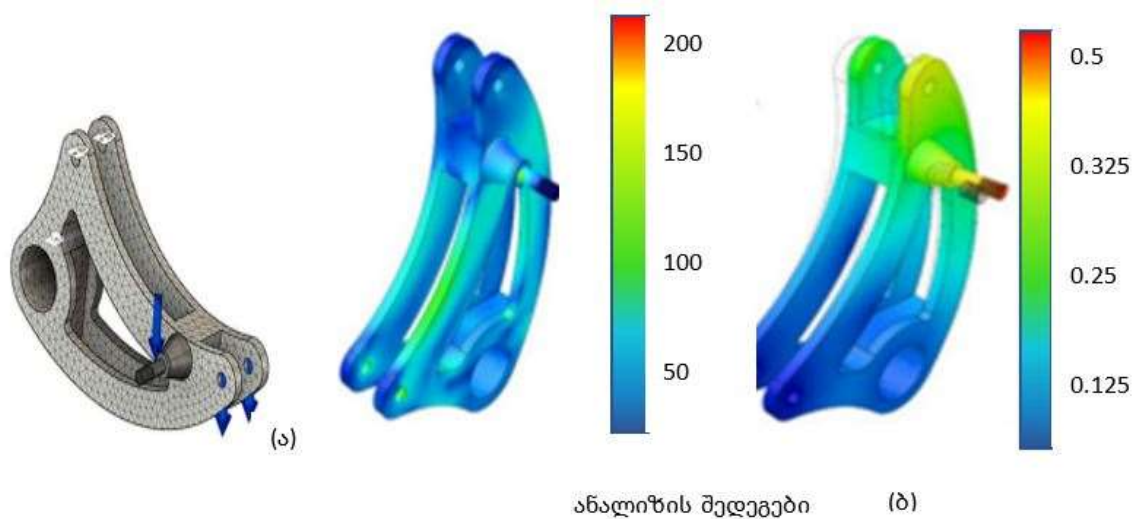


სურათი 2. მარჯვენა უკანა როკერის შეკრების ხედი. შემდეგი სურათი 3, გვიჩვენებს როკერის გეომეტრიას, რომელიც შექმნილია ტრადიციული მეთოდის მიხედვით.



სურათი 3. როკერი შექმნილია ტრადიციული დიზაინის მიდგომით, რომელიც ორიენტირებულია ჩვეულებრივი წარმოების ტექნოლოგიაზე.

როგორც ზემოთ აღინიშნა, საბოლოო დიზაინი მიღწეული იქნა განმეორებითი საცდელის და შეცდომის მიდგომის გამოყენებით, რომელიც დაფუძნებულია CAD სისტემების გამოყენებაზე მოდელირებისთვის და FEM ინსტრუმენტების გეომეტრიის შესაფასებლად და შესამოწმებლად. კერძოდ, როგორც ნაჩვენებია სურათ 4-ზე, სასაზღვრო პირობები, რომელიც მიღებულია როგორც FEM სიმულაციისთვის, ასევე ოპტიმიზაციის კვლევებისთვის, განისაზღვრა ორი ყველაზე კრიტიკული შემთხვევის გათვალისწინებით: აჩქარება კუთხეებში და აჩქარება სწორ ხაზებში. პირველ შემთხვევაში, მაქსიმალური დატვირთვის (2000 N) განაწილება ხდება ამორტიზატორის (1300 N) და ანტიროლის ღეროს (700 N) შორის. მეორე შემთხვევაში, ანტიროლის ღერო არ ექვემდებარება სტრესს, შესაბამისად 2000 N დატვირთვა იხსნება მხოლოდ ზამბარა-დარტყმის შთანთქმის ჯგუფზე.



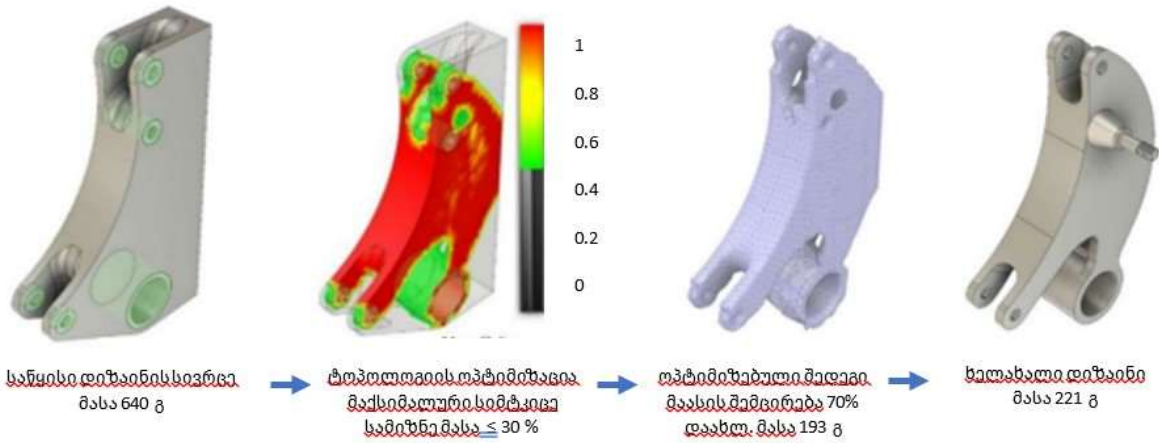
**სურათი 4.** როკერი შექმნილია ტრადიციული დიზაინის მიდგომით: დატვირთვის პირობები (ა) და შედეგები FEM ანალიზის (ბ).

როგორც ნაჩვენებია სურათზე 4b, კომპონენტს აქვს წონა 226 გ, მაქსიმალური გადაადგილება 0.52 მმ და უსაფრთხოების მინიმალური ფაქტორია (**FoS**), რომელიც დაფუძნებულია წვევის სიმლიერის სტრესის მნიშვნელობებზე-2.4. როგორც ზემოთ აღინიშნა, ამ კომპონენტის რედიზაინი, **TO** და **GD** ინსტრუმენტების მიღებით, განხორციელდა მისი მუშაობის გაუმჯობესების მიზნით მოხდა სიხისტის და წონის შემცირება.

### 3.1.1. ტოპოლოგიის ოპტიმიზაციის მიდგომა

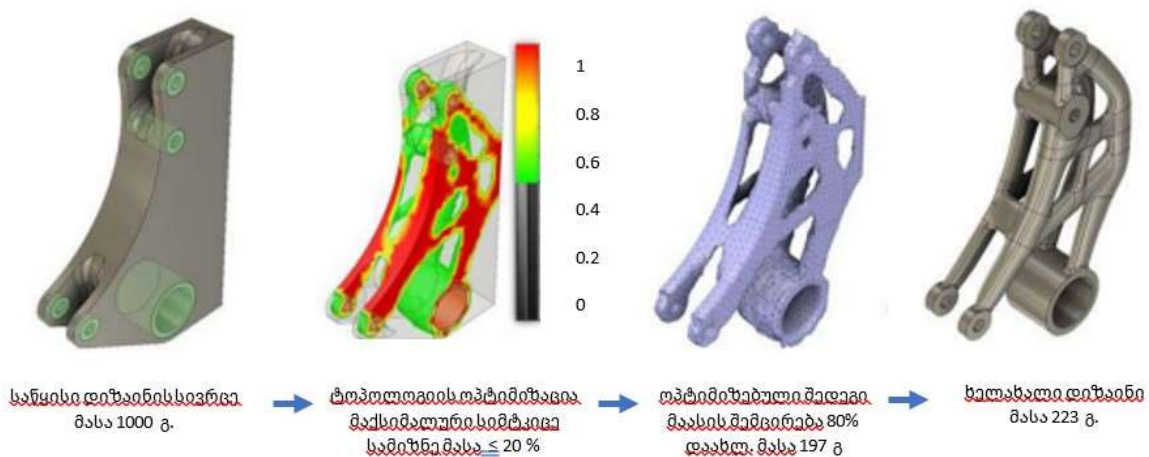
როგორც ნაჩვენებია სურათზე 1, პროცესი დაიწყო **CAD** სისტემის მიღებით, რომელიც მიღებულ იქნა დიზაინერის მიერ საწყისი დიზაინის სივრცის მოდელირებისთვის. ასევე იდენტიფიცირებული და მოდელირებული იქნა ფუნქციური ზედაპირები, ანუ მწვანე მოცულობები, ნაჩვენებია სურათზე 5. შემდეგი გეომეტრია იმპორტირებული იყო ტოპოლოგიის ოპტიმიზაციის გარემოში, რომელშიც მინიჭებული იყო მასალა, განისაზღვრა შეზღუდვები და დატვირთვის პირობები, ორი ობიექტური ფუნქცია იყო სიხისტისა და სამიზნე მასის  $\leq 30\%$ -ის მაქსიმალური გაზრდა. როგორც ნაჩვენებია შემდეგ სურათზე 5, ტოპოლოგიური ოპტიმიზაციის ანალიზის შედეგს აქვს მასა 193 გ.

შემდეგ ეს დახვეწილი მოდელი გადაკეთდა და საბოლოო მახასიათებლებზე დაფუძნებული გეომეტრია დადასტურდა **FEM** ანალიზით, მან აჩვენა 221 გ მასა მაქსიმალური გადაადგილებით 0.28 მმ და მინიმალური FoS 2.4. ამ **TO** ანალიზის შედეგებს არ გააჩნია განსაკუთრებით რთული გეომეტრია და როკერის დამზადება შესაძლებელია როგორც ჩვეულებრივი, ასევე **AM** ტექნოლოგიების საშუალებით.



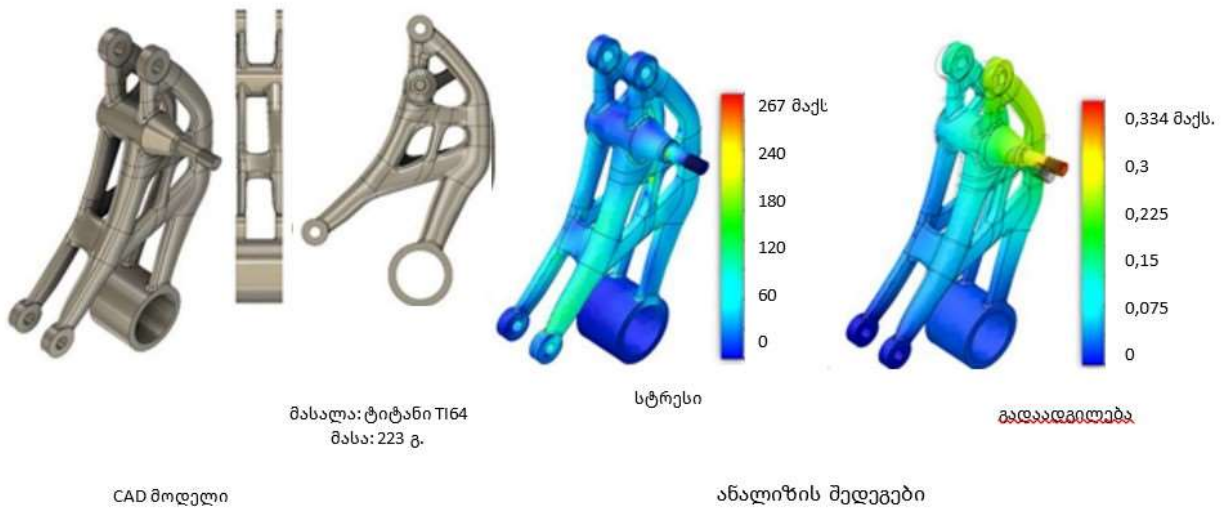
სურათი 5. მიახლოების ეტაპები ერგალში როკერის რედიზაინისთვის

შემდეგი ფიგურა (სურათი 6) გვიჩვენებს როკერის რედიზაინისთვის მიდგომის შედეგებს იმ შემთხვევაში, როდესაც მასალად გამოიყენება ტიტანი. ამ შემთხვევაში, ობიექტური ფუნქციები იყო სიმძიმის და სამიზნე მასის  $\leq 20\%$  მაქსიმიზაცია. საწყისი დიზაინის სივრცე იყო იგივე, რაც განსაზღვრულია წინა ანალიზში, ხოლო **TO** შედეგებმა აჩვენა 80% მასის შემცირება საწყის დიზაინის სივრცესთან შედარებით, ხოლო მასა 1000 გ. მიუხედავად ამისა, რედიზაინის პროცესმა, რომელიც განხორციელდა მახასიათებლებზე დაფუძნებული **CAD** მოდელის მისაღებად, გამოიწვია მცირედი ზრდა, რომლის საბოლოო შედეგი იყო 223 გ.



სურათი 6. **TO** მიდგომების ეტაპები ტიტანში როკერის რედიზაინისთვის.

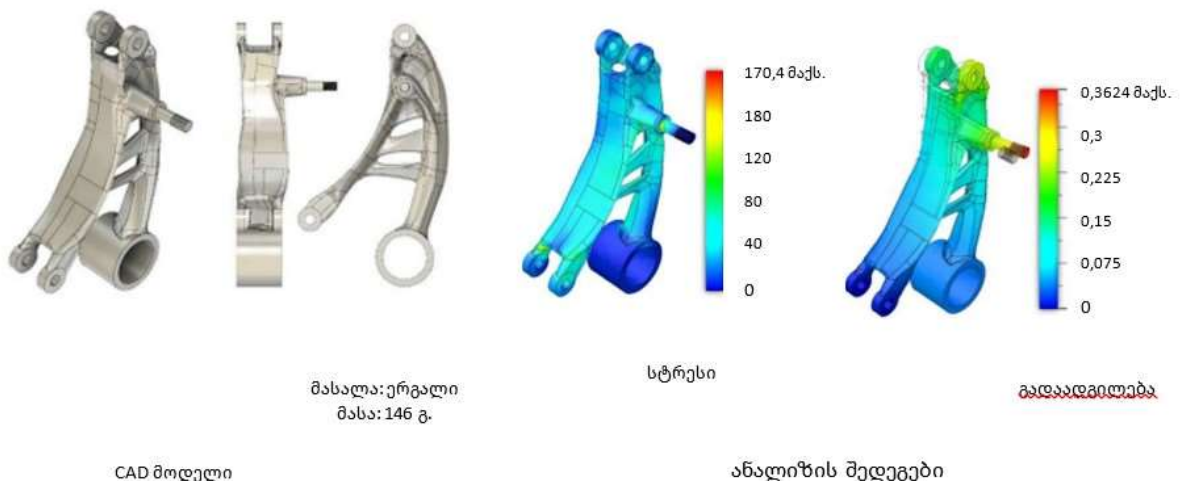
როგორც ზემთ ავლინებთ 2.1 ნაწილში, ხელახალი დიზაინის ოპერაციები ითვალისწინებდა საბოლოო გეომეტრიის გადამოწმების და დამოწმების აუცილებლობას **FEM**-ის ანალიზით (სურათი 7), რომელთა შედეგები აჩვენებს მაქსიმალურ გადაადგილებას 0.33 მმ და მინიმალური **FOS** 3.5. ამ შემთხვევაში, განახლებული მოდელი წარმოადგენს ძალიან რთულ გეომეტრიას, რომლის დამზადება შესაძლებელია მხოლოდ **AM** ტექნოლოგიების საშუალებით.



სურათი 7. ტიტანის გადაკეთებული როკერი დადასტურებულია FEM-ის ანალიზით.

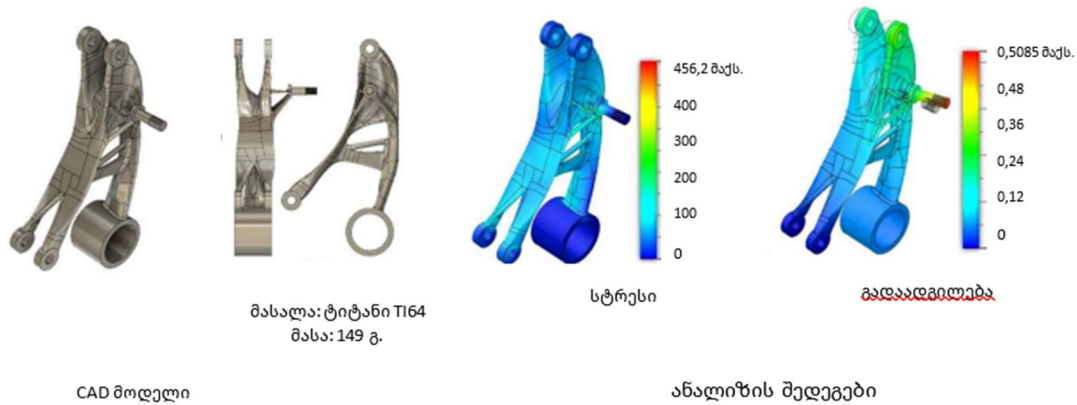
### 3.1.2. გენერაციული დიზაინის მიდგომა

ისევე, როგორც TO მიდგომასთვის, ასევე GD-ის შემთხვევაში დიზაინის პროცესი დაიწყო CAD სისტემის გამოყენებით, ფუნქციური ზედაპირების და დაბრკოლებების გეომეტრიის განვსაზღვრის მიზნით (სურათი 1). TO-სგან განსხვავებით, საწყისი ფორმა არ იქნა მიღებული. შემდგომში განისაზღვრა TO-ის ანალიზისთვის იგივე შეზღუდვები და დატვირთვის პირობები. მიუხედავად ამისა, ობიექტური ფუნქციები იყო მაქსიმალური სიმტკიცის, უსაფრთხოების კოეფიციენტი 2 და სამიზნე მასა 150 გ. გარდა ამისა, ამ შემთხვევაში მხედველობაში იქნა მიღებული ერგალის და ტიტანის მასალები.



სურათი 8. ალუმინის როკერი, რომელიც შექმნილია GD ინსტრუმენტების მიღებით ამ გენერაციული დიზაინის კვლევამ წარმოადგინა 10 დიზაინის გადაწყვეტა. პირდაპირი შედარების მიზნით, იგივე მასალებითა და მინიმალურ FOS-თან, სხვადასხვა მიდგომების შედეგად მიღებულ დიზაინებთან, განიხილებოდა გენერაციული დიზაინის პროცესის გადაწყვეტა, რომელიც წარმოადგენს მინიმალურ 2.4 FOS-ს, რომელსაც აქვს მასა 140 გ და

მაქსიმალური გადაადგილება 0.30 მმ. გარდა ამისა, რადგანაც გამოყენების სფერო არის სარბოლო მანქანები, ასევე განხილული იქნა გადაწყვეტილებები, რომლებიც აჩვენებენ საუკეთესო შედეგებს შესრულების თვალსაზრისით. შედეგად, შემდეგი სურათი 8, ასახავს, საუკეთესო შედეგებს, რომლებიც დაკავშირებულია ერგალის მიღებასთან, მასა 146 გ, მაქსიმალური გადაადგილება 0.36 მმ და მინიმალური FOS 3; და ტიტანის სურათი 9, მასალები, 149 გ მასით, მაქსიმალური გადაადგილება 0.50 მმ, და მინიმალური FOS 2. გარდა ამისა, ალუმინის როკერის წარმოება შესაძლებელია ჩვეულებრივი და AM ტექნოლოგიების საშუალებით, ხოლო ტიტანის კომპონენტი მოითხოვს AM ტექნოლოგიების მიღებას.



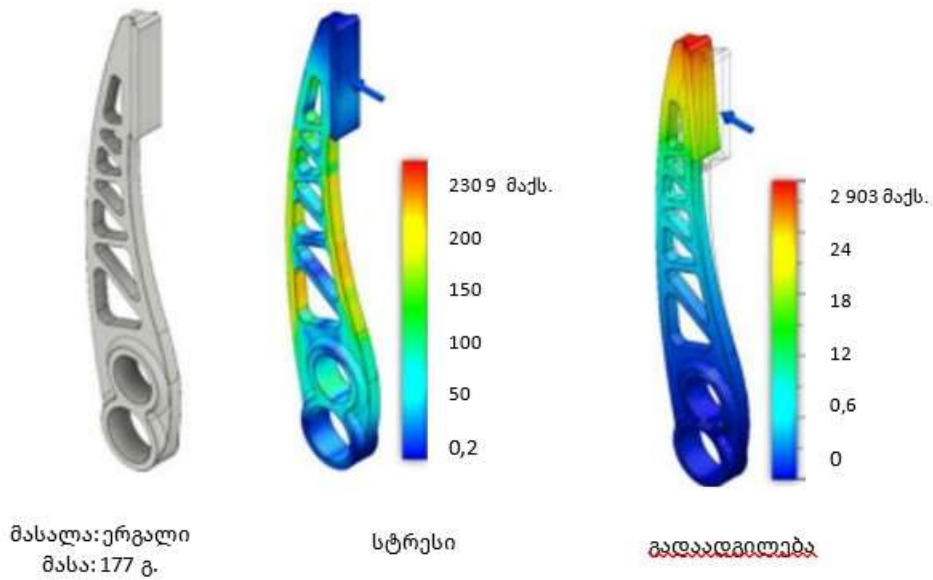
სურათი 9. ტიტანის როკერი, რომელიც შექმნილია GD ინსტრუმენტების მიღებით

### 3.2. მუხრუჭის პედალი

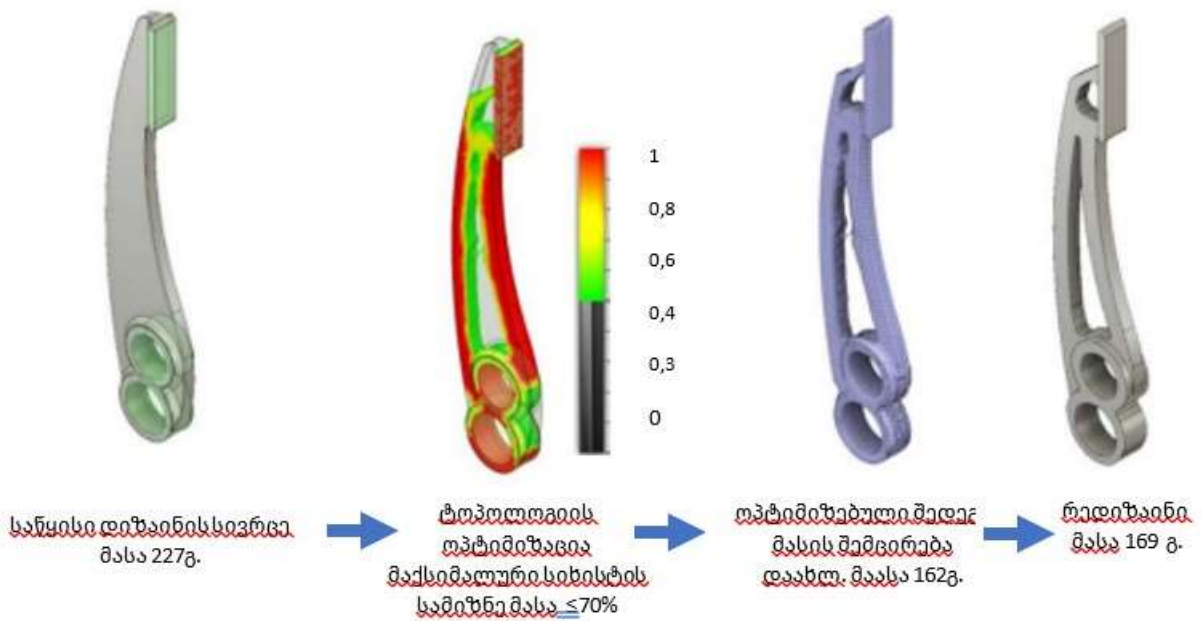
მეორე შემთხვევის შესწავლა არის სამუხრუჭე პედელები. ეს მექანიკური კომპონენტი მოქმედებს როგორც ბერკეტი, რომელიც აწვდის ენერგიას მომხმარებლის ფეხის წნევით ჰიდრავლიკურ მოწყობილობამდე და ააქტიურებს სამუხრუჭე ხალიჩებს. პედელების გეომეტრია, რომელიც გამოსახულია სურათ 10-ზე, გაფორმებულია ტრადიციული მიდგომის შესაბამისად, რათა წარმოებულყო ტრადიციული ჩარხები და კონკრეტულად 3 ღერძიანი საღარავი მანქანა.

#### 3.2.1. ტოპოლოგიის ოპტიმიზაციის მიდგომა

როგორც სურათ 11-ზეა ნაჩვენები, განხორციელდა სამუხრუჭე პედელების ტოპოლოგიური ოპტიმიზაცია მისი გარე ფორმის შენარჩუნებით და ცარიელი ადგილების შევსებით. ერგალის, როგორც მასალის გამოყენებით, დიზაინის სივრცის წონაა 227 გ. მისი შესრულების და, შესაბამისად, სიხიტის გასუმჯობესებლად, ტოპოლოგიურ კვლევაში მითითებული ობიექტური ფუნქცია იყო სამიზნე მასა  $\leq 70\%$ .



სურათი 10. სამუხრუჭე პედლები, რომელიც შექმნილია ტრადიციული დიზაინის მიდგომით, რომელიც ორიენტირებულია ჩვეულებრივი წარმოების ტექნოლოგიაზე.

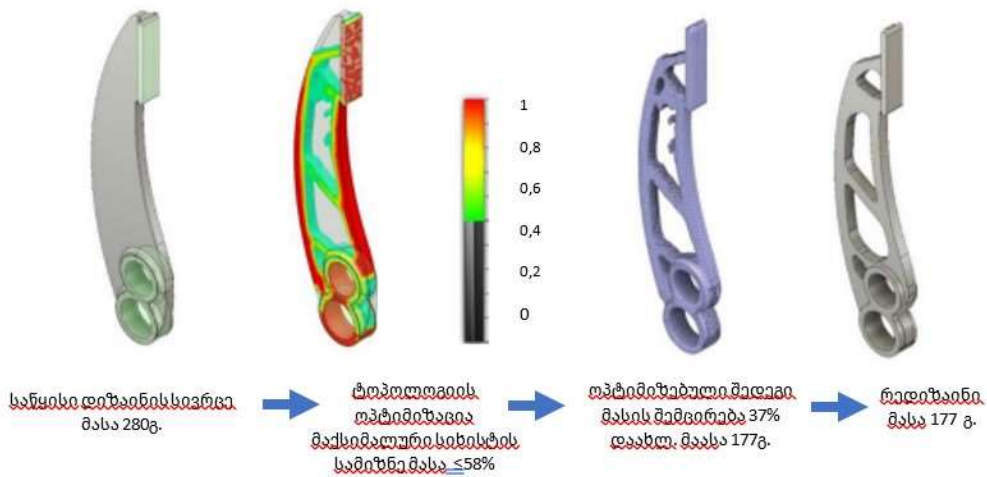


სურათი 11. მიდგომის ეტაპები ერგალში სამუხრუჭე პედლის რედიზაინისთვის.

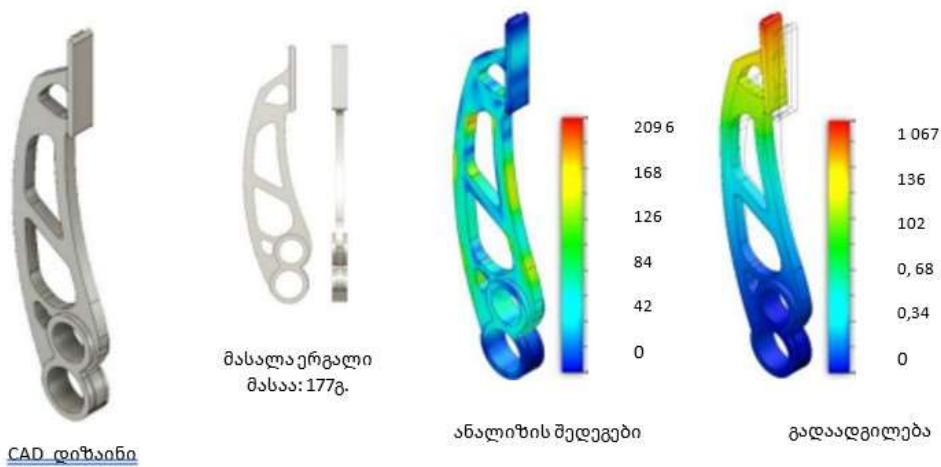
გადაკეთებულ კომპონენტის საბოლოო წონა იყო 169 გ. FEM-ის ანალიზის შედეგად, ეს გამოსავალი აჩვენებს უფრო დაბალ შესრულებას, ვიდრე ტრადიციული მიდგომის მოხედვით შექმნილი. მას შემდეგ, რაც ტოპოლოგიურმა ანალიზის შედეგებმა აჩვენა, რომ ყველაზე სტრესული არეალი არის პედლის კიდების გასწვრივ, ჩატარდა მეორე ტოპოლოგიური ანალიზი, რომელშიც საწყისი დიზაინის სივრცე რედაქტირდა უკანა ფართობის გაფართოებით.

როგორც ნაჩვენებია სურათ 12-ზე, ამ მეორე ტოპოლოგიის ოპტიმიზაციის ანალიზში, საწყისი მასა გაიზარდა 280 გ-მდე. წონის თვალსაზრისით, შედეგის მისაღწევად, რომელიც

შედარებულია სამუხრუჭე პედლებთან, შექმნილია ტრადიციული მიდგომით (სურათი 10), ობიექტური ფუნქცია მასა  $\leq 58\%$ . შემდეგი სურათი 13, გვიჩვენებს საბოლოო გეომეტრიას რედიზაინის ოპერაციების შედეგებს. როგორც როკერისთვის შესრულდა, აქაც განხორციელდა პედალის ტოპოლოგიური ოპტიმიზაცია ტიტანში. კერძოდ, მას შემდეგ, რაც პედლების საწყისი დიზაინის სივრცემ ტიტანში 442 გ-ს მიაღწია, სამიზნე, რომელსაც ჰქონდა საწყისი კომპონენტის მსგავსი წონა (სურათი 10) იყო 37%. ამ ანალიზმა არ მოგვცა დამაკმაყოფილებელი შედეგები, ამიტომ ისინი არ იქნა გათვალისწინებული.



სურათი 12. მეორე ეტაპები რეგულარული სამუხრუჭე პედლისთვის



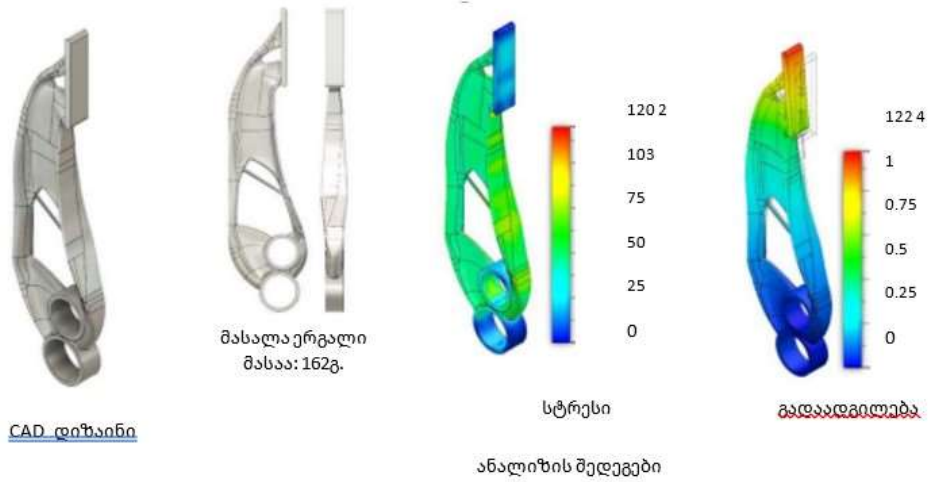
სურათი 13. გადაკეთებული სამუხრუჭე პედლები ერგალში, რომელიც დამოწმებულია FEM- ის ანალიზით

### 3.2.2. გენერაციული დიზაინის მიდგომა

განისაზღვრა იგივე შეზღუდვები და დატვირთვის პირობები, რომლებიც მიღებული იყო ტოპოლოგიური ოპტიმიზაციის ანალიზისთვის. მიუხედავად იმისა, რომ ობიექტური ფუნქციები იყო სიხისტის მაქსიმალური გაზრდა, უსაფრთხოების კოეფიციენტი 2 და სამიზნე მასა 165 გ. გათვალისწინებული იყო ერგალის და ტიტანის მასალები. ამ გენერაციულმა

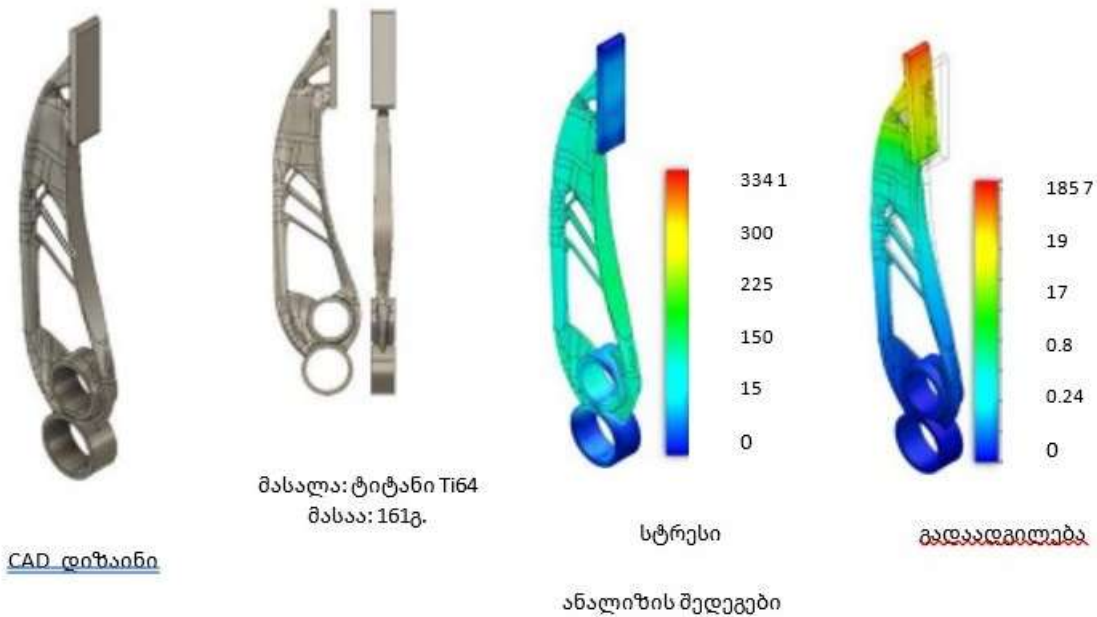


დიზაინის კვლევამ წარმოადგინა 10 დიზაინის გადაწყვეტა. საუკეთესო შედეგი, შესრულების თვალსაზრისით, ალუმინის მასალისთვის ნაჩვენებია შემდეგ სურათში 14.



სურათი 14. გადაკეთებული სამუხრუჭე პედლებიან ერგალში, რომელიც დამოწმებულია FEM- ის ანალიზით.

ტოპოლოგიური ოპტიმიზაციის საწინააღმდეგოდ, რომელიც არ იძლევა ტიტანის მასალასთან შესაბამის შედეგს, გენერაციული დიზაინი წარმატებით ახერხებს ანალიზში დაწესებული მიზნების მოგვარებას. როგორც ეს მოცემულია შემდეგ სურათში 15, მიუხედავად იმისა, რომ გეომეტრია უფრო სუსტია, ვიდრე ერგალის პედალი (სურათი 14), მათი წონა კი თანაბარია.

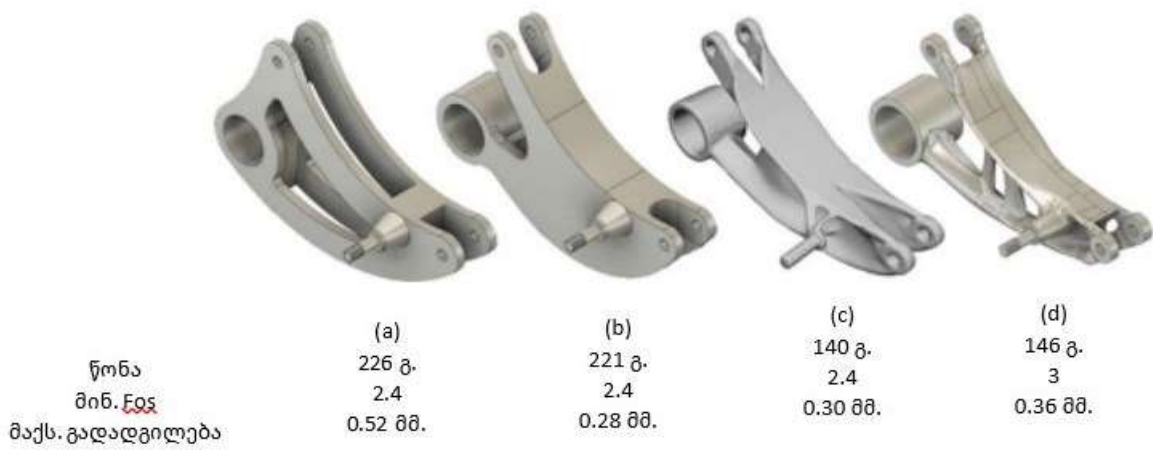


სურათი 15. ტიტანის სამუხრუჭე პედლებიანი, რომელიც შექმნილია GD ინსტრუმენტების მიღებით

### შედეგები

შემდეგი სურათი 16 ადარებს ტრადიციული მიდგომის დიზაინს (სურათი 3), რომელიც მიღებული იქნა საბაზისო ხაზად, TO (სურათი 5) და GD (სურათი 8) მიდგომების შედეგებთან ალუმინის როკერის დიზაინისთვის. კერძოდ, შედარება განხორციელდა იმავე მასალით და FOS-ით მიღწეული დიზაინის გადაწყვეტით, რომელიც მიღებულია ტრადიციული

მიდგომით (სურათი 16 ა). ტოპოლოგიური ოპტიმიზაციის ინსტრუმენტის მიღებით მიღწეული დიზაინის გადაწყვეტამ (სურათი 16 ბ) აჩვენა ძალიან მსგავსი მასა, ფაქტობრივად, დაფიქსირდა ძალიან მცირე შემცირება-2.2%. საწინააღმდეგოდ, მნიშვნელოვანი გაუმჯობესება დაფიქსირდა სიხისტის თვალსაზრისით, მაქსიმალური გადაადგილების 46% -ით შემცირებით. იგივე **FOS**, ანუ 2.4-ის გათვალისწინებით **GD** ინსტრუმენტი წარმოქმნის გამოსავალს, რომელიც გამოსახულია სურათზე 16c, მას ახასიათებს მასის მნიშვნელოვანი შემცირება 38%-ით და მაქსიმალური გადაადგილების შემცირება 42%-ით, ტრადიციული მიდგომით მიღებულ მიმართებასთან (სურათი 16 ა). მიუხედავად იმისა, რომ სურათი 16d ასახავს **GD** ინსტრუმენტის მიერ გენერირებულ საუკეთესო გადაწყვეტას **FOS**-ის თვალსაზრისით. ეს გამოსავალი, ფაქტობრივად, იქმნება 35% მასის შემცირებით, მაქსიმალური გადაადგილების 30%-ით შემცირებით და მინიმალური **FOS**-ის 25% -ით.



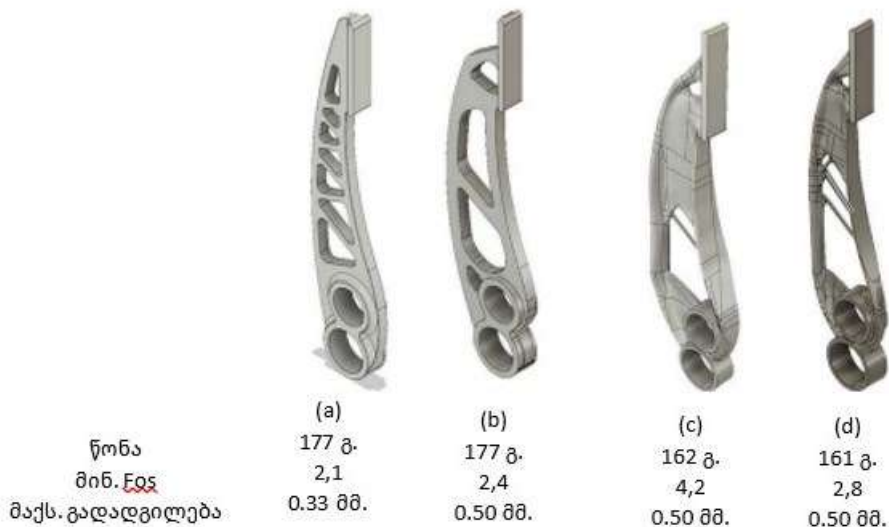
სურათი 16. ალუმინის როკერი, რომელიც შექმნილია ტრადიციული მიდგომით (A), (B) და GD (C, D) ინსტრუმენტებით

მე-15 სურათში გამოსახული შედეგების შედარებისას, აშკარაა, რომ **TO** და **GD** მიდგომები საშუალებას იძლევა გააუმჯობესონ ჩვეულებრივი მიდგომით მიღებული როკერის დიზაინი. შემდეგი სურათი 17, გვიჩვენებს ტიტანის გადამუშავებული როკერის შედეგებს ტოპოლოგიური ოპტიმიზაციით (სურათი 7), და **GD** (სურათი 9) ინსტრუმენტების გამოყენებით. კერძოდ, **GD** მიდგომით მიღებული დიზაინი სურათი 17 ბ საშუალებას გვაძლევს მივალწიოთ 33% წონის შემცირებას, **TO** ინსტრუმენტის გამოყენებით მიღებულ დიზაინთან მიმართებაში (სურათი 17 ა).



სურათი 17. ტიტანის როკერის დიზაინი, რომელიც მიღებულია (ა) და GD (B) ინსტრუმენტებით.

შემდეგი სურათი (სურათი 18) ასახავს სამუხრუჭე პედლის რედიზაინისთვის მიღებულ შედეგებს TO და GD ინსტრუმენტების მიღებით. ჩვეულებრივი მიდგომით შემუშავებულ კომპონენტთან შედარებიდან (სურ. 18 ა) ირკვევა, რომ TO მიდგომა საშუალებას გვაძლევს შევქმნათ გამოსავალი (სურათი 18b), რომელიც აუმჯობესებს შესრულებას, კონკრეტულად, 42%-ით ამცირებს მაქსიმალურ გადაადგილებას და მინიმალურ FOS 9%-ით ზრდის. GD მიდგომა საშუალებას იძლევა კიდევ უფრო გააუმჯობესოს TO-ს გამოყენებით მიღებული გადაწყვეტა. კერძოდ, საუკეთესო გამოსავალია ალუმინისგან დამზადებული დეტალი (სურათი 18c), რომლისთვისაც არის მასის 8.5%-ით შემცირება, მაქსიმალური გადაადგილების 58%-ით შემცირება და 100%-ით გაზრდილი უსაფრთხოების ფაქტორი. რაც შეეხება ტიტანის საუკეთესო გადაწყვეტას



სურათი 18. სამუხრუჭე პედლები, რომელიც შექმნილია ტრადიციული მიდგომით (A), to (B) და GD (C, D) ინსტრუმენტებით.

(სურათი 18d), რომელიც რეალიზებულია GD მიდგომით, ის უარესია, ვიდრე ალუმინის ვერსია (სურათი 18c), მაგრამ მაინც აქვს გარკვეული გაუმჯობესება ტრადიციული მიდგომით მიღებულთან შედარებით (სურათი 18a), რადგან მას აქვს 8.5% მასის შემცირება, გადაადგილების 36% შემცირება და SOF-ის 33%-იანი ზრდა.

### დასკვნა

ნაშრომი ორიენტირებულია დიზაინის ორ მიდგომაზე, რომელიც შეიძლება გამოყენებულ იქნას სამრეწველო კონტექსტებში, როდესაც მიზანია მაღალი ხარისხის პროდუქციის წარმოება. სინამდვილეში, პროდუქტის განვითარების პროცესში ოპტიმიზაციის ინსტრუმენტების დანერგვა უზიარებლად სიმულაციური დიზაინის მიდგომებისკენ, რაც გულისხმობს დიზაინერის როლის მნიშვნელოვან ცვლილებას. ეს გამოწვეულია იმით, რომ ამ ოპტიმიზაციის ინსტრუმენტების მიღება შესაძლებელია დიზაინის პროცესის კონცეპტუალურ და სამოდელო ეტაპზე, რათა დაეხმაროს ინჟინრებს 3D მოდელების გეომეტრიის განსაზღვრაში. შედეგად, როგორც ნაშრომშია ნაჩვენები, თუ ერთის მხრივ დიზაინერის როლი საგრძნობლად შემცირდა ტრადიციულ დიზაინის მიდგომასთან

შედარებით, მეორეს მხრივ, ეს ინსტრუმენტები საშუალებას იძლევიან მიაღწიონ უკეთეს შედეგს მექანიკური შესრულების თვალსაზრისით. ამ კონტექსტში, **AM** ტექნოლოგიები მნიშვნელოვან როლს ასრულებენ, რადგან ისინი საშუალებას იძლევიან ვისარგებლოთ ამ ოპტიმიზაციის ინსტრუმენტებით შემოთავაზებული უპირატესობებით.

კონკრეტულად, განხილული იყო **TO**-ს ინსტრუმენტები და უახლესი **GD** ინსტრუმენტები. ნაშრომში ხაზგასმულია, თუ როგორ იცვლება დიზაინის პროცესი გამოყენებული ოპტიმიზაციის ინსტრუმენტის ტიპის მიხედვით და რა განსხვავებებია შესრულების თვალსაზრისით, იმავე შემთხვევის შესწავლისთვის. კერძოდ, მხედველობაში არის მიიღებული ფორმულა-სარბოლო მანქნის როკერის მკლავი და სამუხრუჭე პედალი. ორი განსხვავებული მიდგომის შედარება გვთავაზობს ასახვას ევოლუციის შესახებ: ტრადიციული მიდგომა, როდესაც გამოიყენება **TO** და **GD** ინსტრუმენტები და ხაზს უსვამს ამ ოპტიმიზაციის ინსტრუმენტების პოტენციალს და შეზღუდვებს, როდესაც მიღებულია **CAD** სისტემებთან ინტეგრირებული გზით.

კერძოდ, რაც ამ გამოკვლევიდან ჩანს არის ის, რომ როგორც **TO**, ასევე **GD** ინსტრუმენტები შეიძლება ეფექტურად იქნას მიღებული ადრეულ ეტაპზე დიზაინის პროცესში, რომელიც ორიენტირებულია **AM**-ზე, რათა შეიქმნას გეომეტრია, რომელიც გამოწვეულია ფუნქციური მოთხოვნებით ან გადაკეთებული კომპონენტებით, რათა ისინი უფრო მსუბუქი და ძლიერი გახდეს. ფაქტობრივად, როკერის დიზაინი, რომელიც მიღებულია ჩვეულებრივი მიდგომით, გაუმჯობესდა **TO**-ს მიღების წყალობით 2.2%-ით მასის შემცირებით და 46%-ის სიმყარით. **GD** მიდგომის გამოყენებამ საშუალება მისცა მიაღწიოს მსგავს შედეგებს სიმყარის თვალსაზრისით, მაქსიმალური გადაადგილების 42%-ის შემცირებით და მასის შემცირების მნიშვნელოვანი გაუმჯობესებით 38%-ით. გარდა ამისა, სამუხრუჭე პედელების შემთხვევის შესწავლისას, **TO**-ს მიღება საშუალებას იძლევა გააუმჯობესოს შედეგი მაქსიმალური გადაადგილების 42% -ით შემცირებით და მინიმალური FOS- ის 9% -ით გაზრდით. **GD** მიდგომა საშუალებას იძლევა კიდევ უფრო გააუმჯობესოს ეს შესრულება, მასის 8,5%-ით შემცირებით, მაქსიმალური გადაადგილების 58% შემცირებით და უსაფრთხოების ფაქტორების 100% -იანი ზრდით.

შემდეგ, ორივე შემთხვევაში, **GD** მიდგომა იძლევა უკეთეს შედეგს, ვიდრე ტოპოლოგიური ოპტიმიზაცია. ეს გამოწვეულია იმით, რომ **TO** ინსტრუმენტები განიცდის შეზღუდვებს მოცემული დიზაინის სივრცის განსაზღვრის გამო, რაც იწვევს ოპტიმალური გადაწყვეტის ნაცვლად ლოკალურ ოპტიმალს. სხვა სიტყვებით რომ ვთქვათ, ოპტიმალური მასალის განაწილებაზე გავლენას ახდენს ინჟინრის მიერ განსაზღვრული საწყისი სასაზღვრო პირობები.<sup>21</sup> შედეგად, სხვადასხვა საწყისი დიზაინის სივრცეები იწვევს სხვადასხვა გადაწყვეტილებებს **TO** მიდგომით. სინამდვილეში, როგორც ნაჩვენებია სურათებში 11 და 12, შეიძლება საჭირო გახდეს მრავალი ტოპოლოგიური ანალი სხვადასხვა საწყისი დიზაინის სივრცით და ობიექტური ფუნქციებით, გაუმჯობესებული ამოხსნის გადაწყვეტის მისღებად. ამის საწინააღმდეგოდ, **GD** ინსტრუმენტები არ საჭიროებს საწყის დიზაინის ადგილს და დიზაინერებს საშუალებას აძლევს მიაღწიონ საუკეთესო ოპტიმიზებულ გადაწყვეტას.

<sup>21</sup> T E. yflopoulos, F.D. Tollnes, M. Steinert, A. Olsen, „State of the art of generative design and topology optimization and potential research needs“, In Proceedings of the DS 91: Proceedings of NordDesign 2018, Linköping, Sweden, 14–17 August 2018.

სპეციფიკური შემთხვევების შესწავლის შედეგების გარდა, ორი განსხვავებული მიდგომის შედარებიდან ირკვევა, რომ ერთ-ერთი ყველაზე აშკარა განსხვავება მდგომარეობს იმაში, რომ **GD** ინსტრუმენტები საშუალებას იძლევიან შეამცირონ და უფრო ეფექტური გახადონ დიზაინის პროცესი, რადგან ისინი გვთავაზობენ სხვადასხვა გადაწყვეტილებების სინთეზურ შედარებით სურათს, რომლებიც მხარს უჭერენ და ამარტივებენ დიზაინერის არჩევანს კონკრეტული განაცხადის შემთხვევაში ოპტიმალური გადაწყვეტის იდენტიფიცირებისას. ამის საპირისპიროდ, **TO** ინსტრუმენტებთან დაკავშირებით, მრავალჯერადი კონცეფციის ოპტიმიზაცია და შემდგომი დადასტურება შეიძლება შრომატევადი იყოს რედიზაინის ეტაპების გამო. ფაქტობრივად, როგორც კვლევამ აჩვენა, აუცილებელია **TO** - ს შედეგების ხელახალი რედიზაინის შესრულება **CAD** სისტემის საშუალებით, რათა დააკმაყოფილოს დიზაინერის საჭიროებები და წარმოების შეზღუდვები. ეს გულისხმობს, რომ შემდეგ ეტაპზე აუცილებელია გადამუშავებული მოდელის სტრუქტურული მოქმედებისა და წარმოების უნარის დადასტურება განმეორებითი პროცესის განხორციელებით. ამის მიუხედავად, ასევე გამოიკვეთა შემოთავაზებული შემთხვევის შესწავლის შედეგებიდან, რომ **TO** - ს მიდგომის შედეგები შეიძლება კვლავ იყოს არაოპტიმალური პროდუქტი.

გარდა ამისა, როგორც ზემოთ აღინიშნა მე-2 ნაწილში, **TO** - სგან განსხვავებით, **GD** ინსტრუმენტები გთავაზობენ უკეთეს ინტეგრაციას **CAD** სისტემებთან და ეს დიზაინერებს აძლევს მოდელირების და ოპტიმიზაციის საშუალებას, რათა საბოლოოდ დახვეწონ კომპონენტის გეომეტრია უნიკალური დიზაინით სიმულაციურ გარემოში დანაკარგების გარეშე. ფაქტობრივად **GD** ინსტრუმენტის ალგორითმების მიერ მოწოდებული გეომეტრიები შეიძლება პირდაპირ რედაქტირდეს და დაიხვეწოს, რედაქტირების მახასიათებლების კომპლექტის საშუალებით.

კიდევ ერთი სხვა ასპექტი, რომელიც წარმოიშვა შედარებისაგან, არის ის, რომ **GD** ინსტრუმენტები ერთდროულად იკვლევენ სხვადასხვა მასალებსა და ტექნოლოგიურ შეზღუდვებს, რის შედეგადაც დიზაინერებს შეუძლიათ დაზოგონ დრო და სრულად შეისწავლონ ვარიანტები, რომლებიც მოიცავენ დიზაინის სივრცეს. **GD** ფაქტობრივად, გვთავაზობს მრავალ საპროექტო გადაწყვეტილებას, სხვადასხვა სტრუქტურისა და მასალების ერთობლიობას ერთ სიმულაციაში, ხოლო **TO**-ია უზრუნველყოფს ერთი დიზაინის გადაწყვეტას. კიდევ ერთი ასპექტი, რომელიც არ უნდა იყოს უგულებელყოფილი, არის ის, რომ **GD** ინსტრუმენტები გვთავაზობენ საწყისი დიზაინის სივრცის განსაზღვრის შესაძლებლობას, რომელიც ოპტიმიზირდება და ეს მნიშვნელოვნად არ მოქმედებს ალგორითმის შედეგებზე. **TO**- მიდგომაში კი პირიქით, დიზაინის სივრცეების სხვადასხვა საწყისი იწვევს სხვადასხვა გადაწყვეტილებებს.

## აბრევიატურა

- AM** -დანამატის წარმოება-Additive Manufacturing  
**CAD** -კომპიუტერის დამხმარე დიზაინი-Computer Aided Design  
**CAE** -კომპიუტერის დამხმარე ინჟინერია-Computer Aided Engineering  
**CAM** -კომპიუტერის დამხმარე წარმოება-Computer Aided Manufacturing  
**CAX** -კომპიუტერის დამხმარე ტექნოლოგიები-Computer Aided Technologies  
**CNC** -კომპიუტერული რიცხვითი კონტროლი-Computer Numerical Control  
**DMLS** -პირდაპირი ლითონის ლაზერული სინთეზირება-Direct Metal Laser Sintering  
**FEA** -სასრული ელემენტის ანალიზი-Finite Element Analysis  
**FEM** -სასრული ელემენტის მეთოდი-Finite Element Method  
**FoS** -უსაფრთხოების ფაქტორი-Factor of Safety  
**GD** -გენერალური დიზაინი-Generative Design  
**TO** -ტოპოლოგიის ოპტიმიზაცია-Topology Optimization

## გამოყენებული ლიტერატურა

1. Tang, Y.; Zhao, Y.F. A survey of the design methods for Additive Manufacturing to improve functional performance. *Rapid Prototyp. J.* 2016, 22, 569–590.
2. Wiberg, A.; Persson, J.; Ölvander, J. Design for Additive Manufacturing—A review of available design methods and software. *Rapid Prototyp. J.* 2019, 25, 1080–1094.
3. Levy, G.N.; Schindel, R.; Kruth, J. Rapid manufacturing and rapid tooling with layer manufacturing (LM) technologies, state of the art and future perspectives. *CIRP Ann.* 2013, 52, 589–609.
4. Kruth, J.-P.; Leu, M.C.; Nakagawa, T. Progress in Additive Manufacturing and Rapid Prototyping. *CIRP Ann. Manuf. Technol.* 1998, 47, 525–540.
5. Vandenbroucke, B.; Kruth, J.-P. Selective laser melting of biocompatible metals for rapid manufacturing of medical parts. *Rapid Prototyp. J.* 2007, 13, 196–203.
6. Leal, R.; Barreiros, F.; Alves, M.; Romeiro, F.; Vasco, J.C.; Santos, M.; Marto, C. Additive Manufacturing tooling for the automotive industry. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2017, 92, 1671–1676.
7. Ituarte, I.F.; Chekurov, S.; Tuomi, J.; Mascolo, J.E.; Zanella, A.; Springer, P.; Partanen, J. Digital manufacturing applicability of a laser sintered component for automotive industry: A case study. *Rapid Prototyp. J.* 2018, 24, 1203–1211.
8. Ngo, T.D.; Kashani, A.; Imbalzano, G.; Nguyen, K.T.Q.; Hui, D. Additive Manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Compos. Part B Eng.* 2018, 143, 172–196.
9. Elsayed, M.; Ghazy, M.; Youssef, Y.; Essa, K. Optimization of SLM process parameters for Ti6Al4V medical implants. *Rapid Prototyp. J.* 2019, 25, 433–447.

10. Dankwort, C.W.; Weidlich, R.; Guenther, B.; Blaurock, J.E. Engineers' CAx education—It's not only CAD. *Comput. Aided Des.* 2004, 36, 1439–1450.
11. Barbieri, L.; Calzone, F.; Muzzupappa, M. Form and function: Functional optimization and Additive Manufacturing. In *Advances on Mechanics, Design Engineering and Manufacturing II*; Springer: Cham, Switzerland, 2019; pp. 649–658.
12. Bathe, K.J. *Finite Element Procedures*; Prentice Hall: Upper Saddle River, NJ, USA, 1996.
13. Sandberg M. *Design for Manufacturing: Methods and Applications Using Knowledge Engineering*. Ph.D. Dissertation, Luleå Tekniska Universitet, Luleå, Sweden, 2007.
14. Thompson, M.K.; Moroni, G.; Vaneker, T.; Fadel, G.; Campbell, R.I.; Gibson, I.; Bernard, A.; Schulz, J.; Graf, P.; Ahuja, B.; et al. Design for Additive Manufacturing: Trends, opportunities, considerations, and constraints. *CIRP Ann.* 2016, 65, 737–760.
15. Pagac, M.; Hajnys, J.; Halama, R.; Aldabash, T.; Mesicek, J.; Jancar, L.; Jansa, J. Prediction of Model Distortion by FEM in 3D Printing via the Selective Laser Melting of Stainless Steel AISI 316L. *Appl. Sci.* 2021, 11, 1656.
16. Afazov, S.; Denmark, W.A.D.; Lazaro Toralles, B.; Holloway, A.; Yaghi, A. Distortion prediction and compensation in selectivelaser melting. *Addit. Manuf.* 2017, 17, 15–22.
17. Sotomayor, N.S.; Caiazzo, F.; Alfieri, V. Enhancing Design for Additive Manufacturing Workflow: Optimization, Design and Simulation Tools. *Appl. Sci.* 2021, 11, 6628.
18. Bendsoe, M.P.; Sigmund, O. *Topology Optimization: Theory, Methods, and Applications*; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2003.
19. Bendsøe, M.P. *Optimization of Structural Topology, Shape, and Material*; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 1995.
20. Sigmund, O.; Maute, K. Topology Optimization Approaches: A comparative review. *Struct. Multidiscip. Optim.* 2013, 48, 1031–1055.
21. Barbieri, L.; Muzzupappa, M. Performance-Driven Engineering Design Approaches Based on Generative Design and Topology Optimization Tools: A Comparative Study. *Appl. Sci.* 2022, 12, 2106. <https://doi.org/10.3390/app12042106>

# Engineering design approaches and a comparative study of topology optimization tools

Ketevan Kveselava<sup>1</sup>; Irakli Bochorishvili<sup>2</sup>; Levan Jiqidze<sup>3</sup>; Liana Tedeshvili<sup>4</sup>; Zurab Samkharadze<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Faculty professor of Technical University of Georgia, Faculty of Informatics and Management Systems; Chief scientist of National Defense Academy of Georgia Named after Davit Agmashenebeli; Academic Doctor of Informatics Engineering;

<sup>2</sup>Associate Professor of Technical University of Georgia, Faculty of Informatics and Management Systems; <sup>3</sup>Associate Professor of Technical University of Georgia, Faculty of Informatics and Management Systems; <sup>4</sup>Associate Professor of Technical University of Georgia, Faculty of Informatics and Management Systems; <sup>5</sup>Chief scientist of Scientific Research Center National Defense Academy of Georgia Named after Davit Agmashenebeli; Candidate of military sciences

---

## Abstract

In the paper there are presented engineering approaches of generative design, the authors note that the advent of additive manufacturing AM (Additive Manufacturing) reveals the limits of current computer-aided design CAD (Computer Aided Design) systems and, at the same time, emphasizes topology optimization TO (Topology Optimization) and generative design of the potential of GD (Generative Design) tools, that have not been fully exploited until now.

In contrast to the traditional approach to design, where designers take a dominant role at each stage of the engineering design process, the paper notes that the introduction of such tools in the product development process leads to simulation design approaches, which implies a significant change in the designer's role.

For this purpose, the paper presents a comparison of two different additive manufacturing design methods, namely TO and GD on products obtained using tools. The comparison aims to reflect the evolution of the traditional approach when using TO and GD tools, and to highlight the potential and limitations of these optimization tools when integrated with CAD systems.

In addition, this comparative study itself can be a useful and practical source for designers to identify the most suitable approach based on their needs and project resources.

A comparative study is conducted by examining a prototype rocker arm and brake pedal design for a Formula Student racing car. Their results, in terms of mechanical performance, show that TO and especially GD tools can be effectively used early in the AM-oriented design process to modify components and make them lighter and stronger.

**Keywords:** Production of supplements, topology optimization, generative design, CAD systems, engineering design approaches.