




**3D ბეჭდვის ტექნოლოგიების გამოყენება ორთოპედიულ ტრავმატოლოგიაში:
მიმდინარე მდგომარეობა და მომავლის პერსპექტივები**

**Applications of 3D Printing Technology in Orthopedic Trauma: Current Status and
Future Perspectives**

 <https://doi.org/10.52340/healthecosoc.2026.10.01.5>

დაჩი ვერულავა^{1a}

Dachi Verulava¹

¹ მედიცინის ფაკულტეტი, თბილისის სახელმწიფო უნივერსიტეტი, თბილისი, საქართველო

¹ Faculty of Medicine, Tbilisi State University, Tbilisi, Georgia

^a dachi.verulava131@med.tsu.ge

აბსტრაქტი

სამგანზომილებიანი (3D) ბეჭდვის ტექნოლოგია ჩამოყალიბდა, როგორც რევოლუციური ინსტრუმენტი ორთოპედიულ ტრავმატოლოგიაში, რაც პაციენტზე ორიენტირებული მკურნალობის უპრეცედენტო შესაძლებლობებს იძლევა. წინამდებარე მიმოხილვა იკვლევს 3D ბეჭდვის თანამედროვე განვითარებასა და მის გამოყენებას ორთოპედიულ ტრავმაში, ხაზს უსვამს ტექნოლოგიის პოტენციალს რთული ქირურგიული გამოწვევების დაძლევის პროცესში. ნაშრომში მოცემულია ორთოპედიულ ქირურგიაში გამოსაყენებელი სხვადასხვა 3D ბეჭდვის ტექნოლოგიების დეტალური ანალიზი. ნაშრომში განხილულია 3D ბეჭდვის როლი ოპერაციამდელ დაგეგმვაში, ქირურგიულ სიმულაციასა და პაციენტზე მორგებული იმპლანტებისა თუ ქირურგიული შაბლონების შექმნაში. მიმოხილვა მოიცავს ტექნოლოგიის გამოყენებას სხვადასხვა ანატომიურ ნაწილში, როგორცაა ზედა და ქვედა კიდურები, მენჯი და ხერხემალი. უახლესი კვლევებით დასტურდება, რომ 3D ბეჭდვის გამოყენებით ჩატარებული ოპერაციები ამცირებს საოპერაციო დროს, სისხლის დანაკარგს, აუმჯობესებს რედუქციის ხარისხს და პოტენციურად განაპირობებს უკეთეს კლინიკურ გამოსავალს. წინამდებარე ნაშრომი ახდენს უახლესი კვლევებისა და კლინიკური გამოცდილების სინთეზს, რაც საშუალებას გვაძლევს შევაფასოთ 3D ბეჭდვის მიმდინარე მდგომარეობა და მისი მომავლის პერსპექტივები. ტექნოლოგიის ევოლუციის კვალდაკვალ, 3D ბეჭდვა პერსონალიზებული და ეფექტური მკურნალობის საწინდარია, რაც საფუძველს უყრის ქირურგიული პრაქტიკის ტრანსფორმაციასა და პაციენტთა მკურნალობის შედეგების გაუმჯობესებას.



საკვანძო სიტყვები: 3D ბეჭდვა, დანამატური წარმოება, ორთოპედიული ტრავმა, ქირურგიული დაგეგმვა

რეკომენდირებული ციტირება: დაჩი ვერულავა (2026). 3D ბეჭდვის ტექნოლოგიების გამოყენება ორთოპედიულ ტრავმატოლოგიაში: მიმდინარე მდგომარეობა და მომავლის პერსპექტივები. *ჯანდაცვის პოლიტიკა, ეკონომიკა და სოციოლოგია*, 10 (1). DOI: <https://doi.org/10.52340/healthecosoc.2026.10.01.5>.

Abstract

Three-dimensional (3D) printing has emerged as a transformative force in orthopedic traumatology, facilitating a shift toward unprecedented levels of patient-centric care. This review provides a comprehensive examination of recent advancements in additive manufacturing and its clinical applications, emphasizing the technology's capacity to overcome intricate surgical obstacles. We offer a rigorous analysis of various 3D printing modalities integrated into orthopedic practice, specifically focusing on their utility in preoperative planning, high-fidelity surgical simulations, and the fabrication of patient-specific implants (PSIs) and personalized surgical guides. The scope of this review encompasses diverse anatomical regions, including trauma of the upper and lower extremities, as well as complex pelvic and spinal injuries. Current clinical evidence indicates that 3D-assisted interventions significantly optimize surgical workflow by reducing operative duration and intraoperative hemorrhage while enhancing the precision of fracture reduction and overall clinical prognosis. By synthesizing contemporary research and empirical data, this paper evaluates the current technological landscape and explores future trajectories. As these technologies continue to mature, 3D printing is poised to redefine surgical standards, fostering more personalized, efficient, and effective outcomes for trauma patients.

Keywords: 3D printing, additive manufacturing, orthopedic trauma, surgical planning.

Recommended Citation: Dachi Verulava (2025). Applications of 3D Printing Technology in Orthopedic Trauma: Current Status and Future Perspectives. *Health Policy, Economics and Sociology*, 10(1). <https://doi.org/10.52340/healthecosoc.2026.10.01.5>.

შესავალი

ორთოპედიული ტრავმების ქირურგიული მართვა რთული პროცესია, რომელიც ფუნქციის სრულფასოვანი აღდგენისა და გრძელვადიანი გართულებების პრევენციისთვის ზუსტ ანატომიურ რედუქციასა და სტაბილურ ფიქსაციას მოითხოვს. მოტეხილობების სირთულე, განსაკუთრებით ისეთ ანატომიურ უბნებში, როგორცაა მენჯი, ტაბუხის ბუდე და პერიარტიკულარული რეგიონები, საჭიროებს ინოვაციურ ქირურგიულ მიდგომებს ოპერაციული შედეგების გასაუმჯობესებლად და პოსტოპერაციული რისკების შესამცირებლად.

ბოლო წლებში სამგანზომილებიანი (3D) ბეჭდვის ტექნოლოგია ორთოპედიულ ქირურგიაში მნიშვნელოვან ინსტრუმენტად იქცა. იგი უზრუნველყოფს ქირურგიული დაგეგმვის ოპტიმიზაციასა და ინდივიდუალურად მორგებული იმპლანტების დიზაინის ახალ შესაძლებლობებს. ეს ტექნოლოგია განსაკუთრებით პერსპექტიულია დიდი ფართობის არარეგულარული ძვლის

დეფექტების რეკონსტრუქციისთვის, სადაც მკურნალობის ტრადიციული მეთოდები ხშირად ნაკლებეფექტურია (Lal & Patralekh, 2018).

3D ბეჭდვა არის ინოვაციური მეთოდი, რომელიც აერთიანებს ტექნოლოგიათა ფართო სპექტრს და უზრუნველყოფს სამგანზომილებიანი ობიექტების შექმნას მასალის შრეებად დამატების გზით. აღნიშნული მიდგომა მნიშვნელოვნად ზრდის ქირურგიული ინტერვენციების სიზუსტეს.

ორთოპედიული ტრავმის დროს 3D ბეჭდვა პაციენტის მოვლის სხვადასხვა ეტაპზე გამოიყენება:

ოპერაციამდელი დაგეგმვა: 3D მოდელები ქირურგებს საშუალებას აძლევს, დეტალურად შეისწავლონ მოტეხილობის არქიტექტონიკა და მოახდინონ ქირურგიული მანიპულაციების წინასწარი სიმულაცია.

ინტრაოპერაციული მხარდაჭერა: პაციენტის ანატომიაზე ადაპტირებული ქირურგიული შაბლონები და პერსონალიზებული იმპლანტები მნიშვნელოვნად ზრდის რეპოზიციისა და ფიქსაციის სიზუსტეს.

ხელოვნური ინტელექტის ინტეგრაცია: AI-სა და 3D ბეჭდვის სინერგია ქმნის საფუძველს რთული ბიოლოგიური სტრუქტურების წარმოების ავტომატიზაციისა და სტანდარტიზაციისთვის.

კლინიკურმა კვლევებმა დაადასტურა 3D ტექნოლოგიების სტატისტიკურად მნიშვნელოვანი უპირატესობა მკურნალობის კონვენციურ მეთოდებთან შედარებით, რაც პირველ რიგში ინტრაოპერაციული ჰემორაგიის ხარისხისა და ქირურგიული ინტერვენციის ხანგრძლივობის მკვეთრ შემცირებაში გამოიხატა (Ligon et al., 2017). ამასთანავე, აღნიშნული მეთოდოლოგიის გამოყენება უზრუნველყოფს მოტეხილობის რედუქციის მაღალ სიზუსტესა და ანატომიური კონგრუენტულობის სრულფასოვან აღდგენას, რაც პირდაპირპროპორციულად აისახება პოსტოპერაციული ფუნქციური მაჩვენებლების გაუმჯობესებასა და პაციენტის რეაბილიტაციის პროცესის დაჩქარებაზე (Xu et al., 2022).

მიუხედავად პოზიტიური კლინიკური ეფექტებისა, 3D ბეჭდვის ტექნოლოგიების ფართომასშტაბიანი ინტეგრაცია ორთოპედიულ პრაქტიკაში დაკავშირებულია გარკვეულ გამოწვევებთან, რაც მოიცავს რთულ მარეგულირებელ ბარიერებს, მაღალ საოპერაციო ხარჯებს, სპეციალიზებული პროფესიული მომზადების აუცილებლობასა და გრძელვადიან კლინიკურ მტკიცებულებათა სიმცირეს. არსებული ლიტერატურის კრიტიკულმა ანალიზმა გამოკვეთა ამ სფეროში არსებული მიმოხილვების ფრაგმენტული ხასიათი, რაც ართულებს ტექნოლოგიური პოტენციალის სრულყოფილ შეფასებას.

წინამდებარე კვლევის მიზანია ლიტერატურაში არსებული აღნიშნული ხარვეზების შევსება 3D ბეჭდვის ტექნოლოგიების დეტალური ანალიზის გზით; კვლევა სისტემატურად აფასებს მათ გამოყენებას ზედა და ქვედა კიდურების, ასევე მენჯის მიდამოს ტრავმული დაზიანებების დროს და განიხილავს ისეთ პერსპექტიულ მიმართულებებს, როგორცაა 4D ბეჭდვა, რაც საფუძველს უყრის სისტემატური სახელმძღვანელო პრინციპების ჩამოყალიბებას.

3D ბეჭდვის ტექნოლოგიური მიმოხილვა ორთოპედიულ ქირურგიაში

3D ბეჭდვა, რომელიც აგრეთვე ცნობილია როგორც დანამატური წარმოება (Additive Manufacturing), თანამედროვე მედიცინის ტრანსფორმაციულ ტექნოლოგიას წარმოადგენს. მისმა მრავალფეროვანმა გამოყენებამ, განსაკუთრებით ორთოპედიული ტრავმატოლოგიის სფეროში, რევოლუციური ცვლილებები გამოიწვია. რთული, ინდივიდუალურად მორგებული სტრუქტურების შრეებად შექმნის შესაძლებლობამ საფუძველი ჩაუყარა პაციენტზე ორიენტირებული მკურნალობის ახალ სტანდარტებს, რაც მოიცავს ქირურგიული დაგეგმვის ოპტიმიზაციასა და პერსონალიზებული იმპლანტების დიზაინს. ტექნოლოგიური პროგრესის კვალდაკვალ, მოსალოდნელია, რომ დანამატური წარმოება სულ უფრო გადამწყვეტ როლს შეასრულებს რთული კლინიკური გამოწვევების დაძლევისა და პაციენტთა მკურნალობის გამოსავლის გაუმჯობესებაში (Zamborsky et al., 2019).

3D ბეჭდვა, იგივე დანამატური წარმოება, აერთიანებს რამდენიმე ფუნდამენტურ ტექნოლოგიას, რომლებიც ერთმანეთისგან გამოყენებული მასალისა და შრეების ფორმირების პრინციპით განსხვავდება. 3D ბეჭდვის ძირითადი მეთოდოლოგიებია ვატ ფოტოპოლიმერიზაცია, მასალის ექსტრუზია, ფხვნილის შერწყმა და ფურცლოვანი ლამინირება.

ვატ-ფოტოპოლიმერიზაცია (Vat Photopolymerization) აერთიანებს რამდენიმე სპეციფიკურ ტექნოლოგიურ მიმართულებას, რომელთა შორის აღსანიშნავია: სტერეოლითოგრაფია (SLA), ციფრული სინათლის დამუშავება (DLP), მასალის ჭავლისებრი დაფრქვევა (Material Jetting), ორფოტონიანი პოლიმერიზაცია (2PP/TPP).

ამ მიმართულებათაგან *სტერეოლითოგრაფია* (SLA) პრაქტიკაში ყველაზე ფართოდ დანერგილი მეთოდია. მისი გამოყენების არეალი მრავალფეროვანია და მოიცავს ისეთ კრიტიკულ სფეროებს, როგორცაა: სამედიცინო მოდელირება (რთული ანატომიური სტრუქტურების ზუსტი რეპლიკაცია ოპერაციამდელი დაგეგმვისთვის), სტომატოლოგიური რესტავრაცია (მაღალი სიზუსტის პროთეზებისა და ორთოდონტიული კონსტრუქციების დამზადება), სწრაფი პროტოტიპირება (რთული გეომეტრიის მქონე დეტალების ოპერატიული წარმოება ფუნქციური ტესტირებისთვის).

მასალის ექსტრუზია წარმოადგენს დანამატური წარმოების ერთ-ერთ ყველაზე გავრცელებულ და ხელმისაწვდომ მიმართულებას, რომელიც ორ ძირითად ტექნოლოგიურ მიდგომას — დნობის დალექვის მეთოდსა (FDM) და პირდაპირი მელნით ბეჭდვას (DIW) აერთიანებს.

დნობის დალექვის მეთოდის (FDM - Fused Deposition Modeling) ტექნოლოგია ეფუძნება თერმოპლასტიკური პოლიმერის დნობასა და მის თანმიმდევრულ, ფენა-ფენა დატანას სამუშაო ზედაპირზე, რაც მას ხელმისაწვდომ და ეფექტურ ინსტრუმენტად აქცევს ანატომიური მოდელებისა და ქირურგიული შაბლონების შესაქმნელად.

ამის საპირისპიროდ, პირდაპირი მელნით ბეჭდვის (DIW - Direct Ink Writing) მეთოდი ორიენტირებულია თხევადი ან ბლანტი მასალების, ე.წ. „ბიომელნების“

ექსტრუზიაზე, რაც ხშირად ოთახის ტემპერატურაზე ხორციელდება. ორთოპედიულ კონტექსტში DIW განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია ბიონჟინერიისთვის, რადგან იგი იძლევა ბიოლოგიურად თავსებადი სკაფოლდების (კარკასების) შექმნის საშუალებას, რომლებიც ხელს უწყობენ ძვლოვანი ქსოვილის რეგენერაციას. აღნიშნული ტექნოლოგიების გამოყენება საშუალებას აძლევს ქირურგებს, მიიღონ პაციენტის ინდივიდუალურ ანატომიაზე ადაპტირებული, მაღალი სიზუსტის სამედიცინო პროდუქცია.

ფხვნილის ფენოვანი შერწყმა (Powder Bed Fusion — PBF) წარმოადგენს დანამატური წარმოების პროცესების კატეგორიას, რომელიც ძირითადად ლითონისა და პოლიმერული კომპონენტების დასამზადებლად გამოიყენება. PBF ტექნოლოგია ეფუძნება თერმული ენერჯის წყაროს მიერ ფხვნილისებრი მასალის ნაწილაკების შერჩევით დნობას, რის შედეგადაც ყალიბდება მყარი სამგანზომილებიანი სტრუქტურა. ამ კატეგორიაში სამი ყველაზე მნიშვნელოვანი ტექნოლოგიური მიმართულება გამოიყოფა:

ლაზერული შერჩევითი დნობა (Selective Laser Melting — SLM): იყენებს მაღალი სიმძლავრის ლაზერს ლითონის ფხვნილის სრული დნობისთვის. ეს მეთოდი ორთოპედიაში წამყვანია ტიტანის ინდივიდუალური იმპლანტების წარმოებისას, რადგან უზრუნველყოფს მასალის მაღალ სიმკვრივესა და მექანიკურ გამძლეობას.

ელექტრონულ-სხივური დნობა (Electron Beam Melting — EBM): ენერჯის წყაროდ იყენებს ელექტრონულ სხივს ვაკუუმურ გარემოში. აღნიშნული ტექნიკა განსაკუთრებით ეფექტურია რთული გეომეტრიის მქონე, ფოროვანი სტრუქტურის იმპლანტების შესაქმნელად, რაც ხელს უწყობს ოსტეოინტეგრაციას (ძვლის ჩაზრდას იმპლანტში).

ლაზერული შერჩევითი შეცხოვა (Selective Laser Sintering — SLS): ძირითადად გამოიყენება პოლიმერული ფხვნილებისთვის. SLM-ისგან განსხვავებით, აქ მასალა სრულად არ დნება, არამედ ნაწილაკების ზედაპირული შერწყმა ხდება მოლეკულურ დონეზე. SLS ფართოდ გამოიყენება ფუნქციური პროტოტიპებისა და ორთოპედიული ორთეზების დასამზადებლად.

ორთოპედიული ტრავმის კონტექსტში, PBF ტექნოლოგიებს შორის SLM და EBM ყველაზე კრიტიკულ როლს ასრულებენ, რადგან ისინი იძლევიან საშუალებას შეიქმნას პერსონალიზებული მეტალის ფიქსატორები, რომლებიც ზუსტად იმეორებენ პაციენტის ძვლის დეფექტის ფორმას.

ფურცლოვანი ლამინაცია წარმოადგენს დანამატური წარმოების მეთოდოლოგიას, რომელიც სამგანზომილებიანი ობიექტის ფორმირებას მასალის თხელი ფურცლების ერთმანეთთან დაკავშირების გზით ახორციელებს. ამ კატეგორიაში ყველაზე გავრცელებული ტექნიკაა ლამინირებული ობიექტების წარმოება (Laminated Object Manufacturing — LOM). LOM ტექნოლოგიის მუშაობის პრინციპი შემდეგი ეტაპებისგან შედგება:

მასალის მომზადება: ნედლეულად გამოიყენება წებოვანი საფარის მქონე ქაღალდი, პლასტმასი ან ლითონის ფოლგა.

ფორმირება: CAD (კომპიუტერული დაპროექტება) მონაცემების საფუძველზე, ლაზერი ან მექანიკური დანა ჭრის თითოეული შრის კონტურს.

ფენოვანი ზრდა: თერმული დამუშავებისა და წნევის გამოყენებით, ახალი ფურცელი ემატება წინა შრეს, ხოლო ზედმეტი მასალა ცილდება. პროცესი მეორდება ობიექტის სრულ ფორმირებამდე.

ტექნოლოგიის მთავარ უპირატესობებს წარმოადგენს დიდი ზომის დეტალების სწრაფი დამზადება, დაბალი თვითღირებულება და გამოყენებული მასალების მრავალფეროვნება. თუმცა, მეთოდს ახასიათებს გარკვეული შეზღუდვებიც: შრეობრივი ბუნების გამო ზედაპირი ხშირად ხორკლიანია და საჭიროებს დამატებით პოსტ-პროცესინგულ დამუშავებას (მაგ. მოხვეწას). გარდა ამისა, მიღებული დეტალები ხასიათდება ანიზოტროპული მექანიკური თვისებებით, რაც იმას ნიშნავს, რომ მათი სიმტკიცე დამოკიდებულია წებოვანი ფენის ხარისხსა და დატვირთვის მიმართულებაზე.

ქვემოთ მოყვანილ ცხრილში წარმოდგენილია 3D ბეჭდვის მეთოდების შედარებით ანალიზს მათი კლინიკური პრიორიტეტულობის მიხედვით სხვადასხვა ტიპის ტრავმული დაზიანებების დროს.

ცხრილი 1. 3D ბეჭდვის ტექნოლოგიების შედარებითი გამოყენება

ტექნოლოგია	პრიორიტეტული გამოყენება	რატომ არის პრიორიტეტული მოცემულ დროს?
ლაზერული შერჩევითი დნობა (SLM)	ტიტანის ინდივიდუალური იმპლანტები	უზრუნველყოფს მასალის მაღალ სიმკვრივესა და მექანიკურ გამძლეობას, რაც აუცილებელია დატვირთვის მქონე ძვლოვანი სეგმენტებისთვის
ელექტრონულ-სხივური დნობა (EBM)	რთული გეომეტრიის ფოროვანი იმპლანტები	ვაკუუმურ გარემოში მუშაობა და ელექტრონული სხივი ხელს უწყობს ოსტეოინტეგრაციას, რაც კრიტიკულია ძვლის ჩაზრდისთვის იმპლანტში.
დნობის დალექვის მეთოდი (FDM)	ანატომიური მოდელები და ქირურგიული შაბლონები	არის ყველაზე ხელმისაწვდომი და ეფექტური ინსტრუმენტი ოპერაციამდელი დაგეგმვისა და ინდივიდუალური გიდების შესაქმნელად.
პირდაპირი მელნით ბეჭდვა (DIW)	ბიოინჟინერია და ძვლოვანი ქსოვილის რეგენერაცია	იძლევა ბიოლოგიურად თავსებადი სკაფოლდების (კარკასების) შექმნის საშუალებას, რომლებიც ხელს უწყობენ ქსოვილის ზრდას

ტექნოლოგია	პრიორიტეტული გამოყენება	რატომ არის პრიორიტეტული მოცემულ დროს?
ლაზერული შერჩევითი შეცხობა (SLS)	ფუნქციური პროტოტიპები და ორთოპედიული ორთეზები	მასალის ზედაპირული შერწყმა მოლეკულურ დონეზე იდეალურია პოლიმერული დამხმარე კონსტრუქციებისთვის

პრიორიტეტული ტექნოლოგიები ტრავმის ლოკალიზაციის მიხედვით

მენჯისა და ტაბუხის ბუდის რთული მოტეხილობები: პრიორიტეტულია PBF (SLM/EBM) ტექნოლოგიები, რადგან ისინი იძლევიან პერსონალიზებული მეტალის ფიქსატორების შექმნის საშუალებას, რომლებიც ზუსტად იმეორებენ რთულ ანატომიურ დეფექტებს.

ზედა კიდურის (აკრომიონი, ლავიწი) დაზიანებები: ხშირად გამოიყენება FDM პრინციპით შექმნილი მოდელები ოსტეოსინთეზის ფირფიტების წინასწარი კონსტრუქციებისთვის, რაც ამცირებს საოპერაციო დროს.

სახსარშიდა (პერიარტიკულარული) მოტეხილობები: პრიორიტეტულია 3D მოდელირება, რომელიც უზრუნველყოფს სასახსრე ზედაპირის მაქსიმალურ ანატომიურ კონგრუენტულობას პოსტტრავმული ართრიტის პრევენციისთვის.

ტერფის ძვლების მძიმე დეფექტები: მაგალითად, კოჭის ძვლის სრული ჩანაცვლებისთვის გამოიყენება ტიტანის 3D იმპლანტი, რაც ტექნოლოგიურად PBF მეთოდს ეფუძნება.

ამგვარად, მეტალის მყარი ფიქსაციისთვის (იმპლანტები) წამყვანია PBF (SLM, EBM), ხოლო ოპერაციამდელი ვიზუალიზაციისა და ქირურგიული გიდებისთვის ყველაზე პრაქტიკულია FDM.

გამოწვევები რთული ტრავმული მოტეხილობების მკურნალობაში

რთული ტრავმული მოტეხილობების მართვა ორთოპედი-ქირურგების წინაშე არსებულ ერთ-ერთ უმნიშვნელოვანეს გამოწვევას წარმოადგენს. დაზიანებული ძვლის ანატომიური ღერძის, სტაბილურობისა და ფუნქციის აღსადგენად ხშირად აუცილებელი ხდება ქირურგიული ინტერვენცია. პრობლემის სირთულეს განაპირობებს მოტეხილობათა მრავალფეროვნება და პაციენტთა ინდივიდუალური ანატომიური თავისებურებები. მოტეხილობათა მრავალფეროვნება აფერხებს მკურნალობის სტანდარტიზებული გეგმების შემუშავებას, რადგან თითოეული კლინიკური შემთხვევა ინდივიდუალურ ქირურგიულ მიდგომას საჭიროებს.

გარდა ამისა, ტრადიციული ქირურგიული მეთოდები ხშირად ეყრდნობა სტანდარტულ იმპლანტებსა და ინსტრუმენტებს, რომლებიც ვერ ერგება თითოეული პაციენტის უნიკალურ ანატომიურ ვარიაციებს. ქირურგიული ინსტრუმენტების ნაკლებმა მოქნილობამ შესაძლოა ხელი შეუშალოს მოტეხილობის ზუსტ ანატომიურ აღდგენასა და საიმედო ფიქსაციას, რაც ზრდის მკურნალობის არასასურველი გამოსავლის რისკს. მოკლედ რომ ვთქვათ, თუ ინსტრუმენტი ან იმპლანტი პაციენტს „არ მიუდგა“ ზუსტად (მოქნილობის ნაკლებობა), ძვალი

კარგად ვერ დაჯდება თავის ადგილზე (სუბოპტიმალური რედუქცია) და ვერც მყარად დაიჭერს (არასათანადო ფიქსაცია).

კვლევები მიუთითებს, რომ პაციენტზე მორგებული იმპლანტები, რომლებიც შექმნილია მოტეხილობის სპეციფიკური პატერნისა და ანატომიის გათვალისწინებით, ეფექტურად ლახავს სტანდარტული ფიქსატორების შეზღუდვებს.

არსებული ქირურგიული მიდგომების ნაკლოვანებებს კიდევ უფრო ამწვავებს მაღალი საოპერაციო სირთულე და გართულებების რისკი. მსგავსი ტრავმები მოითხოვს ფართო ქირურგიულ მიდგომას (ექსპოზიციას), ხანგრძლივ საოპერაციო დროსა და მაღალკვალიფიციურ ქირურგიულ უნარებს. ეს ფაქტორები ზრდის ისეთი გართულებების ალბათობას, როგორცაა ინფექცია, იმპლანტის უკმარისობა და ძვლის შეუხორცებლობა (ფსევდოართროზი).

მოცემული გამოწვევების გათვალისწინებით, აშკარაა ინოვაციური გადაწყვეტილებების საჭიროება, რომლებიც გაზრდის რთული ტრავმული მოტეხილობების მკურნალობის პერსონალიზაციას, სიზუსტესა და უსაფრთხოებას. 3D ბეჭდვის ტექნოლოგია ამ კონტექსტში წარმოჩნდა, როგორც პერსპექტიული ინსტრუმენტი, რომელიც პაციენტის სპეციფიკური იმპლანტების, შაბლონებისა და მოდელების შექმნის გზით ოპტიმიზაციას უკეთებს ქირურგიულ დაგეგმვასა და მის აღსრულებას.

3D ბეჭდვის გამოყენება ორთოპედიულ ტრავმატოლოგიაში

ზედა კიდურის ტრავმა

სპეციალისტებმა შეიმუშავეს 3D ბეჭდვის დამხმარე მეთოდი აკრომიონის ძვლის (os acromiale) და მისი მოტეხილობების სამკურნალოდ (Beliën et al., 2017). კომპიუტერული ტომოგრაფიის (CT) მონაცემებზე დაყრდნობით, მათ შექმნეს პაციენტის აკრომიონის ზუსტი 3D მოდელი, რამაც ქირურგებს საშუალება მისცა, ოპერაციამდე მოერგოთ ოსტეოსინთეზის ფირფიტა ძვლის ანატომიურ ფორმაზე. ამ პერსონალიზებულმა მიდგომამ შეამცირა საოპერაციო დრო, გააუმჯობესა კომუნიკაცია ქირურგსა და პაციენტს შორის და აჩვენა მოტეხილობების სრული შეხორცება პოსტოპერაციულ პერიოდში.

ლავიწის შუა მესამედის მოტეხილობების დროს სპეციალისტებმა გამოიყენეს 3D მოდელები მცირეინვაზიური ოსტეოსინთეზის გასაუმჯობესებლად (You et al., 2016). მოტეხილი და კონტრალატერალური ლავიწის მოდელების გამოყენებით, მათ ზუსტად მთარგეს მახლოკირებელი ფირფიტები პაციენტის უნიკალურ ანატომიას, რამაც მინიმუმამდე დაიყვანა რბილი ქსოვილების დაზიანება და ხელი შეუწყო ძვლოვან შეხორცებას.

კვლევამ აჩვენა, რომ პაციენტებში მხრის ძვლის პროქსიმალური (ზედა) ნაწილის რთული მოტეხილობებისას 3D მოდელების გამოყენებით ოპერაციამდელი დაგეგმვა მნიშვნელოვნად ამცირებს ოპერაციის ხანგრძლივობას, ინტრაოპერაციულ სისხლის დანაკარგსა და ფლუოროსკოპიის (რენტგენოლოგიური კონტროლის) საჭიროებას (Yang et al., 2017).

სპეციალისტებმა 3D ბეჭდვა გამოიყენეს ცერა თითის რეკონსტრუქციისას ფეხის თითის ტრანსპლანტაციის გზით (Zang et al., 2017). მოდელების მეშვეობით მოხდა ძვლის გაკვეთისა და რბილი ქსოვილების (ნაკვეთების) ფორმირების წინასწარი სიმულაცია, რამაც გაზარდა პაციენტთა კმაყოფილება და ფუნქციური შედეგი.

ქვედა კიდურის ტრავმა

ბარდაყის ყელის მოტეხილობები, განსაკუთრებით ხანდაზმულებში, მაღალი კლინიკური რისკის შემცველია. 3D ბეჭდვა აქ რამდენიმე მიმართულებით გამოიყენება:

პერსონალიზებული ფიქსაცია: რთული მოტეხილობებისას 3D მოდელების საფუძველზე ხდება ხრახნების შეყვანის ოპტიმალური ტრაექტორიის განსაზღვრა, რაც ამცირებს ძვლის დამატებითი დაზიანების რისკს.

ოპერაციამდელი სიმულაცია: ქირურგებს საშუალება ეძლევათ, წინასწარ შეარჩიონ იმპლანტის ზომა და ფორმა, რაც საგრძნობლად ამცირებს "საოპერაციო მაგიდასთან" გადაწყვეტილების მიღების დროს.

მუხლის სახსრის შიდა (პერიარტიკულარული) მოტეხილობები, კერძოდ წვივის პლატოს დაზიანებები, ქირურგიული თვალსაზრისით ერთ-ერთი ყველაზე რთული უბანია. 3D ბეჭდვა აქ რამდენიმე მიმართულებით გამოიყენება:

ანატომიური რეკონსტრუქცია: 3D მოდელების გამოყენება საშუალებას იძლევა, მაქსიმალური სიზუსტით აღდგეს სასახსრე ზედაპირის კონგრუენტულობა (შესაბამისობა). ეს კრიტიკულად მნიშვნელოვანია პოსტტრავმული ართროიტის პრევენციისთვის.

ინდივიდუალური შაბლონები: 3D პრინტერზე დამზადებული შაბლონები ეხმარება ქირურგს ძვლის ფრაგმენტების სწორ ორიენტაციაში და იმპლანტის იდეალურ პოზიციონირებაში.

წვივის ქვედა მესამედისა და კოჭ-წვივის სახსრის რთული მოტეხილობების დროს, 3D ტექნოლოგია გამოიყენება:

რთული დეფორმაციების კორექცია: ძვლის არასწორი შეხორცების შემთხვევაში, 3D მოდელირება ეხმარება ქირურგს დაგეგმოს ზუსტი კორექციული ოსტეოტომია (ძვლის ხელოვნური გაკვეთა გასასწორებლად).

ინდივიდუალური პროთეზირება: ტერფის ძვლების (მაგალითად, კოჭის ძვლის - talus) მძიმე დეფექტებისას, შესაძლებელია ტიტანის 3D იმპლანტის დამზადება, რომელიც სრულად ანაცვლებს დაზიანებულ ძვალს.

ამგვარად, ქვედა კიდურის ტრავმების მართვისას 3D ბეჭდვის მთავარი სარგებელია საოპერაციო დროის შემცირება და ბიომექანიკური სიზუსტის გაზრდა, რაც პაციენტს საშუალებას აძლევს უფრო სწრაფად დაუბრუნდეს აქტიურ ცხოვრებას.

მენჯისა და ხერხემლის ტრავმა

3D ბეჭდვის ტექნოლოგიის გამოყენებამ მენჯისა და ხერხემლის ტრავმების დროს იმედისმომცემი შედეგები აჩვენა. მრავალი კვლევა ადასტურებს მის

ეფექტურობას მენჯის ძვლებისა და ტაბუხის ბუდის რთული მოტეხილობების მკურნალობაში. კვლევებმა გამოავლინა, რომ 3D ბეჭდვის დამხმარე ქირურგიული ჩარევები ტაბუხის ბუდის მოტეხილობების დროს ხასიათდება საოპერაციო დროის შემცირებით, სისხლის მინიმალური დანაკარგით, რედუქციის მაღალი ხარისხითა და უკეთესი კლინიკური გამოსავლით ტრადიციულ მეთოდებთან შედარებით.

ქირურგიული შედეგების გაუმჯობესების გარდა, 3D ბეჭდვამ აჩვენა პოტენციური ოპერაციამდელი მომზადების დროის შემცირების კუთხითაც. მკვლევარებმა შეაფასეს მენჯის წინა რკალის მოტეხილობების დროს გამოყენებული 3D დაბეჭდილი ფირფიტების შაბლონების ახალი მეთოდი (Xu et al., 2023). კვლევამ აჩვენა, რომ ფირფიტის წინასწარი კონტურირებისთვის საჭირო დრო 93%-ით, ხოლო თავად 3D ბეჭდვის პროცესი 90%-ით შემცირდა ტრადიციულ მიდგომებთან შედარებით. დროის ეს ეკონომია განსაკუთრებით ღირებულია გადაუდებელი ტრავმატოლოგიის პირობებში, სადაც სწრაფ ინტერვენციას გადაწყვეტი მნიშვნელობა აქვს. ამასთანავე, სხვა კვლევის მიხედვით, პაციენტებს, რომელთაც ტაბუხის ბუდის უკანა კედლისა და სვეტის მოტეხილობებისას ჩაუტარდათ მკურნალობა 3D ბეჭდვით დამზადებული ინდივიდუალური ლითონის ფირფიტებით, ოპერაციიდან 12 თვის შემდეგ აღენიშნებოდათ მენჯ-ბარძაყის სახსრის მნიშვნელოვნად უკეთესი ფუნქციური მაჩვენებლები და ტკივილის დაბალი ინდექსი (Zhang et al., 2024).

მიუხედავად იმისა, რომ მენჯის ტრავმების დროს 3D ბეჭდვის უპირატესობები აშკარაა, მისი გავლენა პოსტოპერაციულ რეაბილიტაციასა და ჰოსპიტალიზაციის ხანგრძლივობაზე კვლავ შესწავლის საგანია. 3D ბეჭდვის ტექნოლოგიის ევოლუციასთან ერთად, მოსალოდნელია, რომ იგი სულ უფრო მნიშვნელოვან როლს შეასრულებს მენჯისა და ხერხემლის რთული დაზიანებების მართვაში, რადგან გვთავაზობს პერსონალიზებულ გადაწყვეტილებებს კლინიკურად მძიმე შემთხვევებისთვის.

ხარისხის კონტროლისა და სტანდარტიზაციის მექანიზმები Point-of-care წარმოებისას

3D ბეჭდვის ტექნოლოგიების ინტეგრაცია უშუალოდ კლინიკურ გარემოში მოითხოვს ხარისხის მართვის მკაცრი სისტემების დანერგვას, რათა უზრუნველყოფილ იქნას პაციენტის უსაფრთხოება და იმპლანტების ბიომექანიკური მდგრადობა. ვინაიდან თითოეული პროდუქტი ინდივიდუალურია, ტრადიციული სერიული წარმოებისთვის დამახასიათებელი სტანდარტიზაციის მეთოდები აქ ნაკლებად ეფექტურია, რაც აუცილებელს ხდის ვალიდაციის ახალი პროტოკოლების შემუშავებას (Morrison et al., 2015).

ხარისხის კონტროლის პროცესი სამ ძირითად ეტაპად იყოფა:

პრე-პროცესინგული ვალიდაცია: ეს ეტაპი მოიცავს ციფრული მონაცემების სიზუსტის კონტროლს. აუცილებელია გამოყენებულ იქნას მხოლოდ სამედიცინო სერტიფიცირების (FDA/CE) მქონე პროგრამული უზრუნველყოფა, რომელიც უზრუნველყოფს DICOM ფაილების (CT/MRI სკანირების მონაცემები) უდანაკარგო კონვერტაციას 3D მოდელებში. დიზაინის ეტაპზე ხელოვნური ინტელექტის

ალგორითმების გამოყენება საშუალებას იძლევა მოხდეს დატვირთვის განაწილების სიმულაცია, რაც მინიმუმამდე ამცირებს იმპლანტის მექანიკური უკმარისობის რისკს.

წარმოების პროცესის მონიტორინგი: Point-of-care წარმოებისას კრიტიკულია მასალების სერტიფიცირება. ნებისმიერი პოლიმერი თუ ლითონის ფხვნილი უნდა შეესაბამებოდეს ბიოთავსებადობის საერთაშორისო სტანდარტებს (მაგ. ISO 10993). ბეჭდვის პროცესში თერმული რეჟიმებისა და შრეების დატანის სიზუსტის უწყვეტი მონიტორინგი აუცილებელია მასალის ანიზოტროპული თვისებების სამართავად და სტრუქტურული დეფექტების თავიდან ასაცილებლად.

პოსტ-პროცესინგული და სტერილიზაციის კონტროლი: 3D დაბეჭდილი ობიექტების რთული გეომეტრია ხშირად ართულებს მათ სრულყოფილ სტერილიზაციას. აუცილებელია სპეციფიკური პროტოკოლების ვალიდაცია, რომლებიც ითვალისწინებენ მასალის თერმულ და ქიმიურ მგრძობელობას. გარდა ამისა, იმპლანტის ზედაპირის საბოლოო დამუშავება (მოხვეწა) უნდა ხორციელდებოდეს მკაცრი კონტროლის ქვეშ, რათა გამოირიცხოს მიკრო-დეფექტების არსებობა, რამაც შესაძლოა რბილი ქსოვილების გაღიზიანება ან ანთებითი პროცესები გამოიწვიოს.

ინსტიტუციურ დონეზე, 3D ბეჭდვის ლაბორატორიებმა უნდა დანერგონ ხარისხის მართვის სისტემა (QMS), რომელიც დაეფუძნება ISO 13485 სტანდარტს (Bos, 2018). ეს უზრუნველყოფს წარმოების პროცესის სრულ მიკვლევადობას და ამცირებს „სწავლის მრუდით“ (learning curve) გამოწვეულ კლინიკურ შეცდომებს, რაც საბოლოოდ ზრდის ნდობას დანამატური წარმოების მიმართ ორთოპედიულ ქირურგიაში (Javaid & Haleem, 2018).

დასკვნა

წინამდებარე მიმოხილვაში განხილულ იქნა 3D ბეჭდვის ტექნოლოგიების მიმდინარე განვითარება ორთოპედიულ ტრავმატოლოგიაში და ხაზი გაესვა მის ტრანსფორმაციულ პოტენციალს სხვადასხვა კლინიკური მიმართულებით. შესწავლილ იქნა ძირითადი მეთოდოლოგიები, მათი პრინციპების, უპირატესობებისა და შეზღუდვების გათვალისწინებით. ნაშრომში გაანალიზდა რთული ტრავმული მოტეხილობების მკურნალობის გამოწვევები და ის ინოვაციური გადაწყვეტილებები, რომლებსაც 3D ბეჭდვა გვთავაზობს ზედა და ქვედა კიდურების, ასევე მენჯისა და ხერხემლის ტრავმების დროს. წარმოდგენილი მტკიცებულებები დასტურებს, რომ აღნიშნული ტექნოლოგია აუმჯობესებს ქირურგიულ დაგეგმარებას, ზრდის რედუქციის სიზუსტეს, ამცირებს საოპერაციო დროსა და სისხლის დანაკარგს. თუმცა, უსაფრთხო კლინიკური დანერგვისთვის გასათვალისწინებელია ისეთი ფაქტორები, როგორცაა მასალის სიმტკიცის ვარიაბელობა, სტერილიზაციის სირთულეები და ქირურგთა გადამზადების აუცილებლობა.

მომავლის პერსპექტივაში, 3D ბეჭდვის ინტეგრაცია ორთოპედიკაში მნიშვნელოვან ნახტომს განახორციელებს. მოსალოდნელია, რომ ძირითადი

ყურადღება გამახვილდება ბიობეჭდვის (Bioprinting) ტექნოლოგიებზე, რაც საშუალებას მოგვცემს შევქმნათ პაციენტზე ორიენტირებული, ბიოთავსებადი იმპლანტები გაუმჯობესებული ოსტეონტეგრაციის უნარით. მაგალითად, ბიობეჭდვა შესაძლებელს გახდის ცოცხალი ქსოვილის კარკასების (სკაფოლდების) დამზადებას, რომლებიც ხელს შეუწყობენ ძვლის რეგენერაციას კონკრეტული დეფექტის არეში.

3D ბეჭდვის სინერგიამ ხელოვნურ ინტელექტთან (AI) შესაძლოა რევოლუცია მოახდინოს ოპერაციამდელ დაგეგმვაში, რაც გამოიხატება ინდივიდუალური იმპლანტებისა და ქირურგიული შაბლონების დიზაინის ავტომატიზაციაში. ხელოვნურ ინტელექტს შეუძლია ოპტიმიზაცია გაუკეთოს იმპლანტის დიზაინს პაციენტის ბიომექანიკაზე დაყრდნობით, რაც გაზრდის მის გამძლეობას. გარდა ამისა, „ჭკვიანი მასალებისა“ და ჩაშენებული სენსორების გამოყენება იმპლანტებში საშუალებას მოგვცემს რეალურ დროში ვაკონტროლოთ შეხორცების პროცესი და ადრეულ ეტაპზე გამოვავლინოთ გართულებები (მაგ. ინფექცია).

ინოვაციური 4D ბეჭდვის ტექნოლოგია ქმნის იმპლანტების დინამიკური ტრანსფორმაციის შესაძლებლობას რეაბილიტაციის პროცესის პარალელურად. ტექნოლოგიურ პროგრესთან ერთად, მოსალოდნელია გადასვლა Point-of-care მოდელზე, რაც გულისხმობს ინდივიდუალური იმპლანტების ოპერატიულ წარმოებას უშუალოდ სამედიცინო დაწესებულების გარემოში. აღნიშნული პერსპექტივების პრაქტიკული რეალიზება კი მოითხოვს მარეგულირებელი ბარიერების დაძლევას, მეთოდის ხარჯეფექტურობის მყარ დასაბუთებასა და ფართომასშტაბიანი კლინიკური კვლევების ჩატარებას გრძელვადიანი შედეგების ვალიდაციისთვის.

გამოყენებული ლიტერატურა

Beliën, H., Biesmans, H., Steenwerckx, A., Bijmens, E., Dierickx, C. (2017). Prebending of osteosynthesis plate using 3D printed models to treat symptomatic os acromiale and acromial fracture. *J Exp Orthop*. 4:34.

Bos, G. (2018). ISO 13485: 2003/2016—medical devices—quality management systems—requirements for regulatory purposes. In *Handbook of Medical Device Regulatory Affairs in Asia* (pp. 153-174). Jenny Stanford Publishing.

Javaid, M., & Haleem, A. (2018). Additive manufacturing applications in orthopaedics: a review. *Journal of clinical orthopaedics and trauma*, 9(3), 202-206.

Lal, H., Patralekh, MK. (2018). 3D printing and its applications in orthopaedic trauma: a technological marvel. *J Clin Orthop Trauma*. 9:260–8.

Ligon, SC., Liska, R., Stampfl, J., Gurr, M., Mülhaupt, R. (2017). Polymers for 3D printing and customized additive manufacturing. *Chem Rev*. 117:10212–90.

Morrison, R. J., Kashlan, K. N., Flanagan, C. L., Wright, J. K., Green, G. E., Hollister, S. J., & Weatherwax, K. J. (2015). Regulatory considerations in the design and manufacturing of implantable 3D-printed medical devices. *Clinical and translational science*, 8(5), 594-600.

Xu, Y., Zhang, F., Zhai, W., Cheng, S., Li, J., Wang, Y. (2022). Unraveling of advances in 3D-printed polymer-based bone scaffolds. *Polymers*. 14:566.

Xu, SS., Yeh, TT., Chen, JE., Li, YT. (2023). Significantly reducing the presurgical preparation time for anterior pelvic fracture surgery by faster creating patient-specific curved plates. *J Orthop Surg Res.* 18:265.

Yang, L., Grottkau, B., He, Z., Ye, C. (2017). Three dimensional printing technology and materials for treatment of elbow fractures. *Int Orthop.* 41:2381–7.

You, W., Liu, LJ., Chen, HX., et al. (2016). Application of 3D printing technology on the treatment of complex proximal humeral fractures (Neer3-part and 4-part) in old people. *Orthop Traumatol Surg Res.* 102:897–903.

Zamborsky, R., Kilian, M., Jacko, P., Bernadic, M., Hudak, R. (2019). Perspectives of 3D printing technology in orthopaedic surgery. *Bratisl Lek Listy.* 120:498–504.

Zang, CW., Zhang, JL., Meng, ZZ., et al. (2017). 3D printing technology in planning thumb reconstructions with second toe transplant. *Orthop Surg.* 9:215–20.

Zhang, H., Guo, HP., Xu, RD., Duan, SY., Liang, HR., Cai, ZC. (2024). Surgical treatment outcomes of acetabular posterior wall and posterior column fractures using 3D printing technology and individualized custom-made metal plates: a retrospective study. *BMC Surg.* 24:157.