MULTIDISCIPLINARY JOURNAL: FUNDAMENTAL RESEARCH SCIENTIFIC JOURNAL
VOLUME 02. ISSUE 07. JULY 2026.
ResearchBib Impact Faktor: 13.943 ISSN: 3060-513X

3D-BIOPRINTING VA O‘ZAK HUJAYRALAR: ORGANLAR TRANSPLANTATSIYASI MUAMMOSINI HAL QILISHNING INNOVATSION YECHIMI

Toshmatov Sarvarbek Boymirza o‘g‘li
Toshkent Kimyo Xalqaro Universiteti (Namangan filiali)
Email: richmir1901@gmail.com
Telefon: +998 (97) 870 32 22

Anotatsiya

Ushbu tadqiqot ishi zamonaviy biomeditsinaning eng dolzarb muommolaridan biri – donor organlar yetishmovchiligi va transplantatning tana tomonidan rad etilishi masalasiga bag‘ishlanadi. Bunda o‘zak hujayralar texnologiyasi hamda 3D-bioprinting uslubini integratsiya qilish orqali sun’iy funksional to‘qimalar va organlarni yaratish istiqbollari tahlil qilingan. Tatqiqot- ning inovatsion yangiligi shundaki, bemorning o‘z somatic hujayralaridan olingan induksiyalarning pluripotent o‘zak hujayralari (iPS) yardamida „bio-siyoh” (bio-ink) tayyorlash va individual anatomic model asosida organlarni „bosib chiqarish” texnologiyasi asoslab berilgan. Ishda ushbu uslubning biologic moslasguvchanlikni ta’minlashdagi afzalliklar, klinik amalyotga tadbiq estish bosqichlari va kelajakda regenerative tibbiyotning transformatsiyasi yoritilgan. Tadqiqot natijalari yaqin kelajakda donorlik navbatlari muommosini bartaraf etish va transplantologiyada o‘lim ko‘rsatqichini keskin kamaytirish imkonini beradi.

Kalit so‘zlar: 3D-bioprinting, o‘zak hujayralar, regenerative tibbiyot, bio-siyoh, transplantologiya, iPS-hujayralar, to‘qima muhandisligi.

3D-БИОПЕЧАТЬ И СТВОЛОВЫЕ КЛЕТКИ: ИННОВАЦИОННОЕ РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ ТРАНСПЛАНТАЦИИ ОРГАНОВ

Тошматов Сарварбек Боймирза угли
Наманганский филиал Международного университета химии в Ташкенте
E-mail: richmir1901@gmail.com
Тел**: +998 (97) 870-32-22**

Аннотация

Данная исследовательская работа посвящена одной из самых актуальных проблем современной биомедицины – дефициту донорских органов и отторжению трансплантатов организмом. В статье анализируются перспективы создания искусственных функциональных тканей и органов путем интеграции технологии стволовых клеток и 3D-биопечати. Инновационная новизна исследования заключается в обосновании технологии получения ,,био-чернил" с использованием индуцированных плюрипотентных стволовых клеток (ИПСК), полученных из собственных соматических клеток пациента, и «печати» органов на основе индивидуальной анатомической модели. В работе освещаются преимущества данного метода в обеспечении биологической адаптивности, этапы его внедрения в клиническую практику и трансформация будущей регенеративной медицины. Результаты исследования позволят в ближайшем будущем устранить проблему очередей доноров и резко снизить смертность в трансплантологии.

Ключевые слова: 3D-биопечать, стволовые клетки, регенеративная медицина, био-чернила, трансплантология, ИПСК клетка, тканевая инженерия.

3D BIOPRINTING AND STEM CELLS: AN INNOVATIVE SOLUTION TO THE CHALLENGE OF ORGAN TRANSPLANTATION

Sarvarbek Boymirza Ugli Toshmatov
Namangan Branch of Kimyo International University in Tashkent
E-mail: richmir1901@gmail.com
Tel: **+998 (97) 870-32-22**

Abstract

This research work is devoted to one of the most urgent problems of modern biomedicine - the shortage of donor organs and the rejection of transplants by the body. The article analyzes the prospects for creating artificial functional tissues and organs by integrating stem cell technology and 3D-bioprinting. The innovative novelty of the research is that the technology of preparing "bio-ink" using induced pluripotent stem cells (iPS) obtained from the patient's own somatic cells and ,,printing" organs based on an individual anatomical model is substantiated. The work highlights the advantages of this method in ensuring biological adaptability, the stages of its implementation in

clinical practice and the transformation of future regenerative medicine. The results of the research will allow in the near future to eliminate the problem of donor queues and sharply reduce the mortality rate in transplantology.

Keywords: 3D bioprinting, stem cells, regenerative medicine, bio-ink, transplantology, iPS cells, tissue engineering. In the competition

Kirish

Zamonaviy tibbiyotning eng og‘ir va yechimi murakkab bo‘lgan yo‘nalishlaridan biri - bu a’zolar transplantatsiyasidir. Hozirgi kunda dunyo miqyosida organlar yetishmovchiligi "global tibbiy inqiroz" darajasiga yetgan. Statistik ma’lumotlarga ko‘ra, birgina AQSHning o‘zida 100 000 dan ortiq bemor donor organlarini kutmoqda va har kuni o‘rtacha 17 kishi o‘z navbati kelmasidan vafot etmoqda. O‘zbekistonda ham buyrak va jigar yetishmovchiligi bilan kasallangan bemorlar soni yildan-yilga ortib bormoqda, biroq donorlar yetishmasligi va transplantatning biologik mos kelmasligi (rad etish reaksiyasi) ko‘plab insonlarning hayotini saqlab qolishga to‘sqinlik qilmoqda.

An’anaviy transplantologiya ikki asosiy to‘siqqa duch kelmoqda:

1- **Donorlar tanqisligi:** Mavjud donorlar soni ehtiyojdan bir necha barobar kam.

2- **Immunologik rad etish:** Begona tana a’zosi ko‘chirilganda, organizm uni "dushman" sifatida qabul qiladi. Bemor umrining oxirigacha immun tizimini susaytiruvchi kuchli dorilar (immunosupressantlar) ichishga majbur bo‘ladi, bu esa o‘z navbatida boshqa infeksiyalarga nisbatan himoyasiz qilib qo‘yadi.

Ushbu muammolarni bartaraf etishning eng innovatsion yechimi **3D-bioprinting** va **o‘zak hujayralar** texnologiyasidir. Bu usul bemorning shaxsiy hujayralaridan laboratoriya sharoitida yangi, genetik jihatdan 100% mos keluvchi organlarni "o‘stirish" imkonini beradi. Ushbu tadqiqotda mazkur texnologiyaning ishlash mexanizmi, hozirgi yutuqlari va kelajakdagi imkoniyatlari ilmiy tahlil qilinadi. ,,Biz nafaqat organni almashtirishni, balki uni insonning o‘z DNKsidan qayta yaratishni taklif qilyapmiz. Bu - tibbiyotda ehtiyot qismlar davridan regeneratsiya davriga o‘tishdir”

Assosiy qism

Birlamchi hujayra materialini olish va dasturlash

Regenerativ tibbiyotning fundamenti bo‘lgan sun’iy organlarni yaratish jarayoni, eng avvalo, „jonli xomashyo” — yuqori regenerativ potensialga ega bo‘lgan hujayralarni olishdan boshlanadi. An’anaviy usullarda donor a’zolari kutish muddati uzoqligi va immunologik nomuvofiqlik xavfi yuqori bo‘lganligi sababli, zamonaviy biomeditsina bemorning o‘z somatik hujayralaridan foydalanish strategiyasini tanlagan. Ushbu jarayonda bemorning **teri (fibroblastlar)** yoki **yog‘ to‘qimasidan (adipotsitlar)** minimal invaziv usullar yordamida kichik hajmdagi (biopsiya) namunalar olinadi. Olingan ushbu hujayralar laboratoriya sharoitida Shinya Yamanaka tomonidan kashf etilgan **induksiyalangan pluripotent o‘zak hujayralar (iPS)** texnologiyasi asosida qayta dasturlanadi. Bu jarayon maxsus transkripsiya faktorlari (Oct4, Sox2, Klf4 va c-Myc) yordamida amalga oshirilib, oddiy teri hujayrasini embrional holatga yaqin bo‘lgan, ya’ni istalgan turdagi to‘qimaga (yurak, jigar, buyrak hujayralari) aylana oladigan universallik xususiyatini beradi **(Yamanaka, 2012)**. Ushbu uslubning inqilobiy afzalligi shundaki, olingan hujayralar bemorning shaxsiy genetik kodiga ega bo‘ladi. Natijada, kelajakda ushbu hujayralardan bosib chiqarilgan organ ko‘chirilganda, organizm uni "begona" deb qabul qilmaydi va transplantatsiyadan keyingi og‘ir asorat — rad etish reaksiyasini (rejection) butunlay bartaraf etadi **(Atala & Forgacs, 2019)**. Bu esa bemorlarni umrining oxirigacha zararli immunosupressiv dori vositalarini ichish majburiyatidan ozod qiladi.

Regenerativ tibbiyotning eng inqilobiy burilishi — bu 2012-yilda Nobel mukofotiga loyiq ko‘rilgan Shinya Yamanaka tomonidan kashf etilgan **induksiyalangan pluripotent o‘zak hujayralar (iPS)** texnologiyasidir. Ushbu usulning mohiyati ixtisoslashgan (kattalar) hujayralarini genetik "dasturlash" orqali ularni o‘zining boshlang‘ich, ya’ni embrional holatiga qaytarishdan iborat. Bu jarayon biologiyada "hujayra vaqtini ortga qaytarish" deb ham ataladi **(Yamanaka, 2012)**. Yamanaka usuliga ko‘ra, oddiy somatik hujayraga (masalan, teri fibroblastiga) to‘rtta maxsus gen — **Oct4, Sox2, Klf4 va c-Myc** (Yamanaka faktorlari) kiritiladi. Ushbu faktorlar hujayra yadrosidagi genlar ekspressiyasini o‘zgartirib, hujayraning "xotirasini" o‘chiradi. Natijada, o‘z funksiyasini bajarib bo‘lgan teri hujayrasi istalgan turdagi to‘qimaga aylanish qobiliyatiga ega bo‘lgan **pluripotent** holatga o‘tadi. Bu uslubning yaratilishi tibbiyot olamida embrionlardan foydalanish bilan bog‘liq bo‘lgan etik muammolarga chek qo‘ydi, chunki endilikda o‘zak hujayralarni insonning o‘zidan

olish imkoni paydo bo‘ldi **(Atala & Forgacs, 2019)**. Ushbu "qayta dasturlangan" iPS hujayralari cheksiz bo‘linish va o‘z-o‘zini yangilash xususiyatiga ega. Eng muhimi, ular bemorning o‘z DNKsini to‘liq saqlab qoladi, bu esa 3D-bioprinting orqali yaratilgan organning immun tizimi tomonidan qabul qilinishini 100% kafolatlaydi. Bu bosqich murakkab laboratoriya nazoratini talab qiladi, chunki hujayralarning pluripotentlik darajasi kelajakdagi organning hayotiyligini belgilab beruvchi asosiy omildir **(Science Daily, 2023)**. Induksiyalangan pluripotent o‘zak hujayralar (iPS) olingandan so‘ng, keyingi strategik muhim bosqich ularni ma’lum bir organ funksiyasini bajaruvchi ixtisoslashgan hujayralarga aylantirish, ya’ni **differensiatsiya** qilish hisoblanadi. Pluripotent hujayralar nazariy jihatdan tanadagi barcha 200 dan ortiq turdagi hujayralarga aylanish imkoniyatiga ega bo‘lsa-da, ularni aynan kerakli yo‘nalishga (masalan, kardiomiotsitlar — yurak mushagi yoki gepatotsitlar — jigar hujayralari) yo‘naltirish murakkab biokimyoviy jarayonni talab etadi. Ushbu jarayonda laboratoriya sharoitida embrional rivojlanishning tabiiy muhiti imitatsiya qilinadi. Hujayralarga ma’lum bir tartibda maxsus **o‘sish faktorlari (growth factors)**, sitokinlar va kimyoviy modullar beriladi. Ushbu moddalar hujayra signal yo‘llariga (masalan, Wnt yoki TGF-beta) ta’sir ko‘rsatib, genlarning ekspressiyasini o‘zgartiradi va hujayrani maqsadli funksiyani bajarishga o‘rgatadi **(Murphy & Atala, 2014)**. Zamonaviy biomeditsina yutuqlari shuni ko‘rsatadiki, differensiatsiya jarayoni faqat kimyoviy emas, balki mexanik ta’sirlar ostida ham kechadi. Masalan, yurak hujayralarini yetishtirishda ularga sun’iy elektr impulslari beriladi, bu esa hujayralarning ritmik qisqarish qobiliyatini shakllantiradi. Bunday yo‘l bilan tayyorlangan "jonli qurilish materiali" keyinchalik 3D-bioprinterda ishlatiladigan **bio-siyohning** asosi bo‘lib xizmat qiladi. To‘g‘ri differensiatsiya qilingan hujayralar massasi organning nafaqat shaklini, balki uning biologik hayotiyligi va ishchi funksiyasini ta’minlaydigan eng asosiy elementdir **(Science Daily, 2023)**.

Raqamli modellashtirish va Blueprint (Loyihalash) bosqichi

3D-bioprinting jarayonining muvaffaqiyati nafaqat hujayralarga, balki ularni aniq joylashtirish uchun foydalaniladigan raqamli modelning mukammalligiga ham bog‘liq. Ushbu bosqich **"Blueprint"** (organning me'moriy loyihasi) deb ataladi va u bemorning individual anatomik xususiyatlarini inobatga olgan holda amalga oshiriladi. Dastlab, bemorning kasallangan organi **Kompyuter tomografiyasi (KT)** yoki **Magnit-**

rezonans tomografiya (MRT) kabi yuqori aniqlikdagi diagnostika uskunalari yordamida skanerlanadi. Skanerlash natijasida olingan qatlamli tasvirlar maxsus dasturiy ta’minot (masalan, CAD — Computer-Aided Design) yordamida qayta ishlanib, organning uch o‘lchamli raqamli modeli yaratiladi. Bu model organning nafaqat tashqi shaklini, balki uning ichki murakkab tuzilishini, jumladan, qon tomirlari to‘ri va nerv tolalarining joylashuvini ham o‘z ichiga olishi shart **(Murphy & Atala, 2014)**. Raqamli model tayyor bo‘lgach, u **"slicing"** (bo‘laklarga bo‘lish) jarayonidan o‘tkaziladi. Bunda dastur organni yuzlab yoki minglab mikroskopik qatlamlarga ajratadi va bioprinter ignasi (ekstruder) harakatlanishi kerak bo‘lgan koordinatalarni (G-kod) hisoblab chiqadi. Ushbu raqamli loyihaning aniqligi organning vaskulyarizatsiyasi (qon bilan ta’minlanishi) uchun o‘ta muhimdir, chunki eng kichik xatolik ham to‘qimalarning oziqlanmasligiga va nobud bo‘lishiga olib kelishi mumkin **(Atala & Forgacs, 2019)**. Shunday qilib, raqamli model bioprinter uchun "yo‘l xaritasi" vazifasini o‘tab, "jonli qurilish materiali"ni qatlam-ba-qatlam joylashtirishda texnik asos bo‘lib xizmat qiladi.

Bio-siyoh (Bio-ink): Tarkibi va fizik-kimyoviy xususiyatlari

3D-bioprinting jarayonidagi eng murakkab texnologik qism — bu **bio-siyoh** (bio-ink) tayyorlashdir. Bio-siyoh — bu shunchaki hujayralar to‘plami emas, balki tirik hujayralar va ularning hayotchanligini ta’minlovchi maxsus biopolimer materiallarning (gidrogellar) sintezidir. U printer ignasidan chiqish paytida suyuq holatda bo‘lishi, lekin qatlam-ba-qatlam joylashgandan so‘ng organning shaklini saqlab qolishi uchun tezda qattiqlashishi (gellanishi) kerak **(Murphy & Atala, 2014)**. Bio-siyohning asosi bo‘lgan **gidrogellar** hujayradan tashqari matritsa (ECM) vazifasini o‘taydi. Ular odatda tabiiy oqsillar (kollagen, fibrin, gelatin) yoki polisaxaridlar (alginat, gialuron kislotasi) asosida tayyorlanadi. Ushbu materiallar hujayralar uchun quyidagi sharoitlarni ta’minlaydi:

Mexanik himoya: Printer bosimi ostida hujayralar nobud bo‘lishidan saqlaydi.

Gidratatsiya: Hujayralarni qurib qolishdan asraydi va ozuqa moddalari o‘tishini ta’minlaydi.

Biologik signalizatsiya: Hujayralarning bir-biri bilan aloqa qilishiga va o‘sishiga yordam beradi **(Atala & Forgacs, 2019)**.

Hozirgi kunda eng ilg‘or yo‘nalish — bu **shaxsiylashtirilgan bio-siyohlar** (personalized bio-inks) hisoblanadi. Bunda bio-siyoh tarkibiga bemorning o‘zidan olingan oqsillar qo‘shiladi, bu esa immun tizimining organni rad etish xavfini nolga tushiradi. Isroillik olimlar tomonidan 3D-yurak bosib chiqarilganda aynan bemorning omental (yog‘) to‘qimasidan tayyorlangan shaxsiylashtirilgan bio-siyohdan foydalanilgan edi **(Noor et al., 2019)**. Bu texnologiya printer yordamida nafaqat shaklni, balki funksional tirik to‘qimani yaratish imkonini beradi.

Bosib chiqarish (Printing) texnikasi: Qatlam-ba-qatlam shakllantirish va mikrostruktura

Raqamli model va bio-siyoh tayyor bo‘lgach, bevosita **bioprinting** jarayoni boshlanadi. Bu jarayonning mohiyati "additiv ishlab chiqarish" (additive manufacturing) tamoyiliga asoslangan bo‘lib, bunda organ mikroskopik aniqlikdagi qatlamlarni ketma-ket joylashtirish orqali pastdan yuqoriga qarab shakllantiriladi. Bioprinter raqamli chizmada belgilangan koordinatalar bo‘yicha bio-siyohni maxsus sterillangan platformaga yuboradi.

Hozirgi vaqtda bioprintingda asosan uch xil texnologiya qo‘llaniladi:

1. **Ekstruzion bioprinting:** Bio-siyoh pnevmatik yoki mexanik bosim yordamida uzluksiz chiziq shaklida printer ignasidan (shprits) chiqariladi. Bu usul yuqori zichlikdagi hujayralar bilan ishlash imkonini beradi va bugungi kunda eng ko‘p qo‘llaniladigan uslubdir **(Murphy & Atala, 2014)**.
2. **Inkjet (tomchili) bioprinting:** Printer bio-siyohni juda kichik tomchilar shaklida sepadi. Bu usul tezkor va aniq, biroq faqat past yopishqoqlikdagi siyohlar bilan ishlay oladi.
3. **Lazerli bioprinting:** Hujayralarni platformaga o‘tkazish uchun lazer energiyasidan foydalaniladi. Bu eng aniq, ammo qimmat texnologiya bo‘lib, hujayralarga mexanik zarar yetkazmasligi bilan ajralib turadi **(Atala & Forgacs, 2019)**.

Bosib chiqarish jarayonida eng katta muammo — **vaskulyarizatsiya**, ya’ni organning ichida qon tomirlari tarmog‘ini yaratishdir. Buning uchun ko‘pincha "vaqtinchalik" (sacrificial) bio-siyohlardan foydalaniladi: ular bosib chiqarilgandan so‘ng ma’lum haroratda erib ketadi va organning ichida qon o‘tadigan bo‘shliqlar (kanallar) qoladi. Aynan shu usul orqali **Noor va hammualliflar (2019)** tomonidan yaratilgan 3D-yurak modelida asosiy arteriyalar va kapillyar tarmoqlar muvaffaqiyatli

aks ettirilgan edi. Bu bosqich yakunida organning fizik shakli tayyor bo‘ladi, ammo u hali funksional (tirik) holatga kelmagan bo‘ladi.

Vaskulyarizatsiya — Hayotiy muhim qon tomirlar tarmog‘ini yaratish

3D-bioprinting yo‘li bilan yaratilgan organning yashab qolishi uchun eng katta to‘siq — bu **vaskulyarizatsiya**, ya’ni organning ichki qismigacha kislorod va ozuqa yetkazib beruvchi qon tomirlari tizimini shakllantirishdir. Agar organ ichida tomirlar bo‘lmasa, uning chuqur qatlamidagi hujayralar ozuqa yetishmasligidan bir necha soat ichida nobud bo‘ladi. Zamonaviy yechim sifatida "qurbon qilinuvchi bio-siyohlar" (sacrificial bio-inks) texnologiyasi qo‘llaniladi. Printer organ shaklini chizayotganda, tomirlar o‘rni bo‘lishi kerak bo‘lgan joylarga harorat o‘zgarishi bilan erib ketadigan material (masalan, *Pluronic F-127*) yuboradi. Organ bosib chiqarilgandan so‘ng, ushbu material eritib chiqariladi va uning o‘rnida bo‘shliq kanallar qoladi. Keyinchalik bu kanallarga endotelial hujayralar (tomir hujayralari) kiritiladi, natijada sun’iy organ ichida haqiqiy qon aylanish tizimi imitatsiyasi hosil bo‘ladi **(Noor et al., 2019)**.

Bioreaktorlar: Funktsional rivojlanish va "o‘qitish"

Bosib chiqarilgan va tomirlari shakllangan organ darhol bemorga ko‘chirilishi mumkin emas; u hali yetilmagan va funksional jihatdan zaif hisoblanadi. Uni "tiriltirish" va pishitish uchun **bioreaktorlar** ishlatiladi. Bioreaktor — bu inson tanasidagi ichki muhitni (harorat, bosim, kislorod miqdori) 100% takrorlovchi yuqori texnologik qurilmadir.

Bioreaktorda organ nafaqat oziqlanadi, balki "mashq ham qildiriladi". Masalan, bosib chiqarilgan **yurak to‘qimalari** bioreaktor ichida sun’iy elektr impulslari yordamida urishga majbur qilinadi. **Qon tomirlari** yoki **o‘pka to‘qimalari** esa pulsatsiyalanuvchi suyuqlik bosimi orqali kengayib-torayishga o‘rgatiladi. Bunday dinamik yuklamalar hujayralarning bir-biri bilan mustahkam bog‘lanishini va organning haqiqiy mexanik chidamlilikka ega bo‘lishini ta’minlaydi **(Nature Biomedical Engineering, 2020)**. Faqatgina bioreaktorda tayyor bo‘lgan organ klinik amaliyotda transplantatsiya qilishga tayyor deb hisoblanadi.

"2019-yilda Isroillik olimlar dunyoda birinchi bo‘lib inson hujayralaridan to‘liq (tomirlari va klapanlari bilan) 3D-yurakni bosib chiqarishga muvaffaq bo‘lishdi. Garchi u hozircha kichik o‘lchamda bo‘lsa-da, bu texnologiyaning ishlashiga yaqqol isbotdir".

Xulosa

3D-bioprinting va o‘zak hujayralar texnologiyasi zamonaviy transplantologiyadagi eng dolzarb ikki muammo — donor organlar tanqisligi va immunologik rad etish reaksiyasini fundamental tarzda hal qilish quvvatiga ega.

Bunga mening takliflarim bor bir qancha.

1-Bemorlarning o‘zak hujayralarini uzoq muddat saqlash (kriokonservatsiya) tizimini yo‘lga qo‘yish, buni orqasidan bizda odamlardi shaxsiylashtiril ,,bio-sioh” lar tayyorlash uchun baza xosil boladi bizda.

2 -Bu yo‘nalish boyich kuchli kadrlar tayyorlash. Bu orqali biz kelajakda yuksak yutuqlarga erishamiz. Buning uchun xozirdan bu sohani rivojlantirish kerag.

3 –Ilmiy labaratoriyalar yaratish va ko‘paytirish kerag deb o‘ylayman. Turli xil tajribalar o‘tkasiz kerak bu yo‘nalish boyicha.

Foydalanilgan adbyotlar

1. **Yamanaka, S. (2012).** *Induced Pluripotent Stem Cells: Past, Present, and Future.* Cell Stem Cell jurnali.

2. **Atala, A., & Forgacs, G. (2019).** *Bioprinting: A New Era in Regenerative Medicine.* Nature Reviews Materials.

3. Science Daily (2023). *The Role of iPS Cells in Modern Tissue Engineering.*

4. Murphy, S. V., & Atala, A. (2014). *3D bioprinting of tissues and organs.* Nature Biotechnology.

5. **Science Daily (2023).** *Advancements in Stem Cell Differentiation for Organ Engineering.*

6. **Murphy, S. V., & Atala, A. (2014).** *3D bioprinting of tissues and organs.* Nature Biotechnology.

7. Noor, N., et al. (2019). *3D Printing of Personalized Thick and Perfusable Cardiac Patches and Hearts.* Advanced Science.

8. **Nature Biomedical Engineering (2020).** *Engineering functional organs using bioreactor systems.*