

DIGITALNI BLIZANCI

Autorica: Petra Guljaš

studentica Medicinskog fakulteta Osijek, studij Medicine

Hoće li liječnik jednog dana moći „liječiti“ pacijenta u virtualnom svijetu, prije nego što donese odluku u stvarnom? Upravo to omogućuje koncept digitalnih blizanaca, tehnologije koja ubrzano pronalazi svoje mjesto u modernoj medicini. Riječ je o virtualnim modelima pacijenata koji koriste stvarne podatke kako bi simulirali tijek bolesti i odgovor na terapiju. U eri personalizirane medicine i umjetne inteligencije, digitalni blizanci predstavljaju potencijalnu revoluciju u načinu na koji razumijemo i liječimo bolesti. Sve veća količina dostupnih medicinskih podataka, od genetskih informacija do detaljnih slikovnih prikaza, omogućila je razvoj modela koji mogu oponašati složene procese unutar ljudskog organizma. Time se otvara mogućnost prelaska s tradicionalnog, reaktivnog pristupa liječenju na prediktivni i preventivni model medicine. U takvom pristupu liječnik ne reagira samo na postojeće stanje, već može unaprijed procijeniti tijek bolesti i prilagoditi terapiju svakom pojedinom pacijentu.

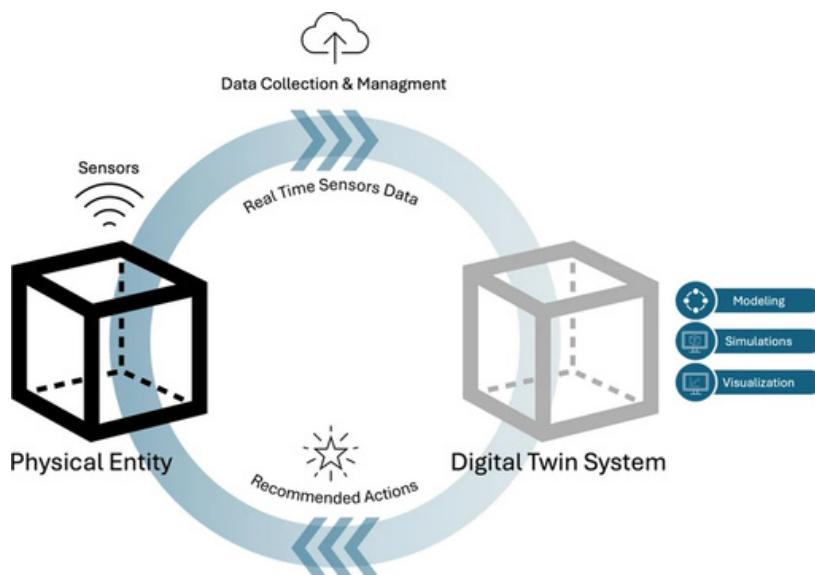
Što su zapravo digitalni blizanci?

Digitalni blizanac može se definirati kao dinamičan virtualni model, koji predstavlja stvarni fizički sustav i kontinuirano se ažurira podacima iz stvarnog svijeta. Za razliku od klasičnih simulacija, digitalni blizanci omogućuju dvosmjernu interakciju između stvarnog i virtualnog sustava, čime se postiže real-time praćenje i predikcija (Slika 1).

U medicini tzv. „human digital twin“ predstavlja personalizirani model pacijenta koji ima sposobnost predviđanja kliničkih ishoda i podrške u donošenju odluka. Takvi modeli mogu integrirati podatke poput genetskih informacija, slikovnih metoda i kliničkih nalaza, što omogućuje precizniju individualizaciju liječenja. Osim toga, digitalni blizanci mogu uključivati i podatke o životnim navikama pacijenata, poput prehrane, razine tjelesne aktivnosti i izloženosti stresu. Integracijom svih tih čimbenika dobiva se cjelovit prikaz zdravstvenog stanja pojedinca, što dodatno povećava točnost predviđanja. Upravo ta sveobuhvatnost čini digitalne blizance jednim od najnaprednijih alata suvremene medicine.

Tehnologija iza virtualnog pacijenta

Razvoj digitalnih blizanaca temelji se na napretku nekoliko ključnih tehnologija. Umjetna inteligencija i strojno učenje omogućuju analizu velikih količina podataka i prepoznavanje obrazaca koji bi inače ostali neprimijećeni. Uz to, sve veću ulogu imaju nosivi uređaji poput pametnih satova koji kontinuirano prate fiziološke parametre. Takvi podaci dodatno obogaćuju digitalni model pacijenta i čine ga preciznijim. Drugim riječima, digitalni blizanac nije samo model, on je stalno „živi“ sustav koji se razvija zajedno s pacijentom. Važnu ulogu imaju i napredne slikovne metode te računalne simulacije koje omogućuju vizualizaciju anatomskih i funkcionalnih promjena u organizmu.



Slika 1. Konceptualni prikaz standardne arhitekture sustava digitalnih blizanaca, Elgammal i sur. (2025), *Journal of Big Data*, CC BY 4.0.

Uz razvoj računalne snage i sve sofisticiranijih algoritama, digitalni modeli postaju sve realističniji i pouzdaniji. Time se stvaraju temelji za njihovu širu primjenu u svakodnevnoj kliničkoj praksi.

Gdje se u medicini već koriste?

Kardiologija: digitalno srce prije stvarnog zahvata. Jedno od najnaprednijih područja primjene digitalnih blizanaca je kardiologija. Virtualni modeli srca omogućuju liječnicima da unaprijed simuliraju zahvate i procijene njihov učinak. Na taj način moguće je smanjiti rizik komplikacija i donijeti sigurnije odluke. Dodatno, ovakvi modeli mogu pomoći u razumijevanju složenih poremećaja srčanog ritma te odabiru optimalne terapije za pojedinog pacijenta (Slika 2).

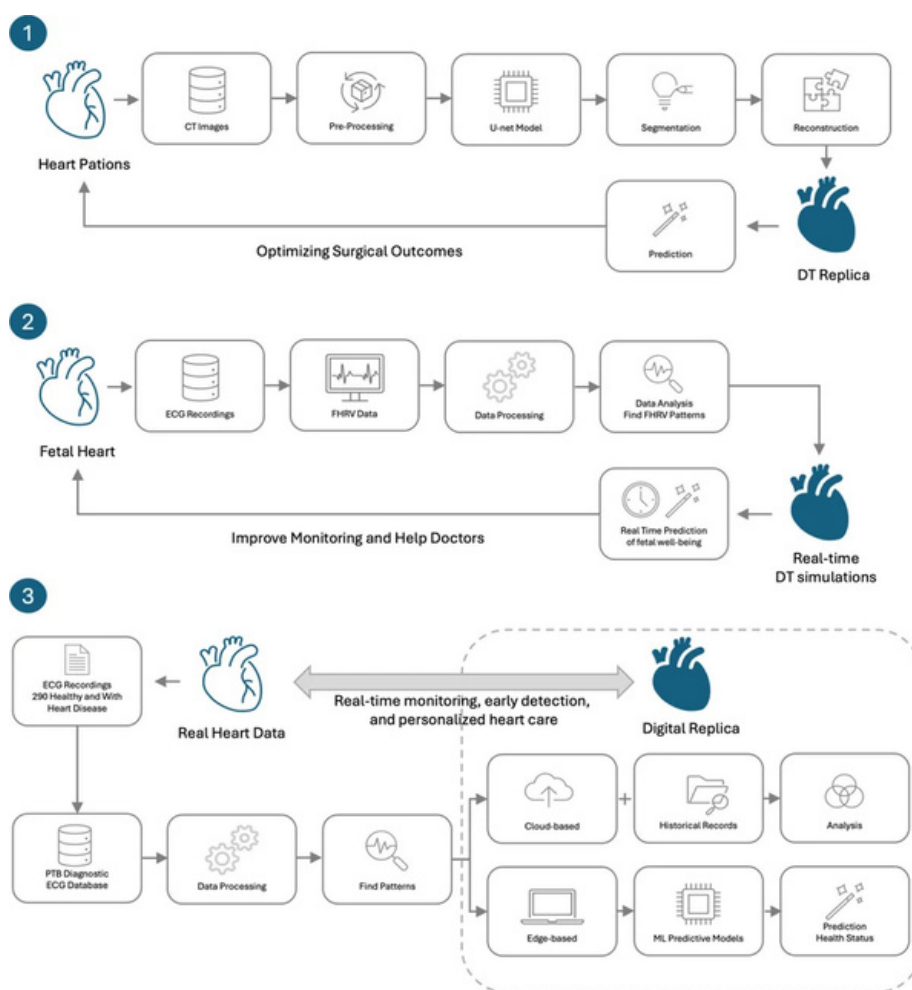
Onkologija: personalizirana borba protiv tumora. U liječenju raka digitalni blizanci omogućuju simulaciju rasta tumora i predviđanje odgovora na terapiju. Umjesto pristupa „jedan lijek za sve“, terapija se može prilagoditi svakom pacijentu. Ovakav pristup posebno je važan jer različiti pacijenti često različito reagiraju na istu terapiju, što predstavlja veliki izazov u onkologiji.

Kirurgija: operacija prije operacije. Kirurzi sve češće koriste virtualne modele kako bi unaprijed „izveli“ operaciju. To je posebno korisno kod složenih zahvata gdje svaka odluka može imati veliki utjecaj na ishod. Time se povećava sigurnost zahvata i smanjuje mogućnost neočekivanih komplikacija tijekom operacije.

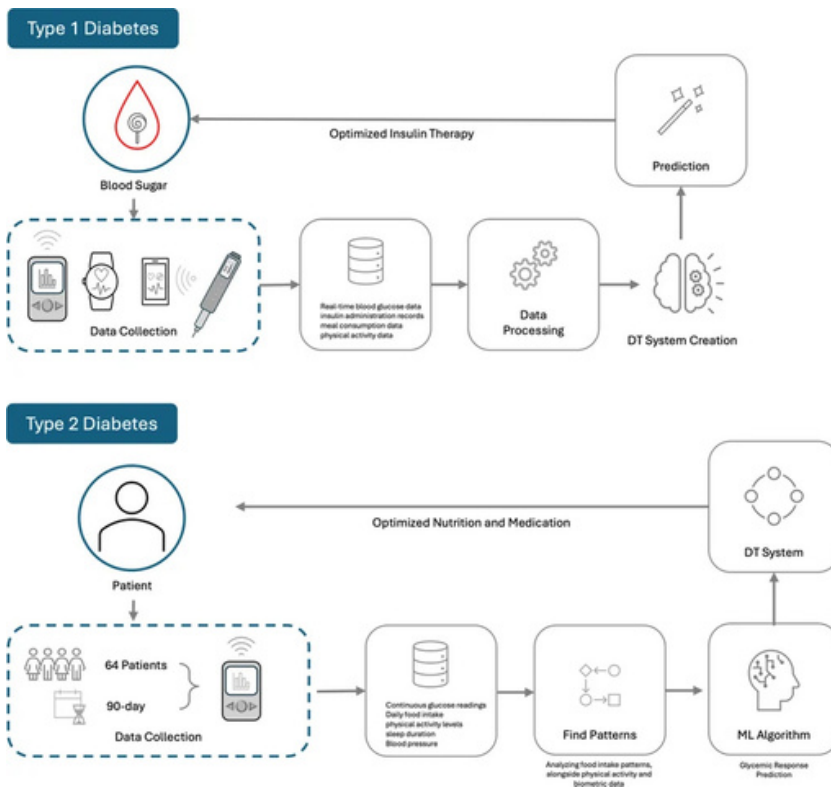
Intenzivna medicina: predviđanje ishoda. U jedinicama intenzivnog liječenja digitalni blizanci mogu pomoći u predviđanju reakcije pacijenta na određene intervencije, što olakšava donošenje brzih i preciznih odluka. U okruženju gdje su odluke često vremenski kritične, ovakvi alati mogu imati presudnu ulogu u ishodu liječenja.

Zašto je ovo velika stvar?

Digitalni blizanci donose niz prednosti koje mogu značajno promijeniti medicinsku praksu: liječenje prilagođeno svakom pacijentu, smanjenje rizika od pogrešnih terapijskih odluka, mogućnost testiranja terapije bez izlaganja pacijenta i bolji ishodi liječenja (Slika 3). Ova tehnologija pomiče medicinu iz „reaktivnog“ u



Slika 2. Pregled primjene digitalnih blizanaca za studije povezane sa srcem, koji ilustrira tijekove rada za optimizaciju kirurških ishoda kod aortne stenozе, praćenje fetalnog otkucaja srca (FHR) u stvarnom vremenu i prediktivne modele srčanih bolesti korištenjem okvira za digitalni prijenos podataka u oblaku i na rubu mreže. Svaki odjeljak ističe ključne korake od prikupljanja podataka do predviđanja, demonstrirajući ulogu digitalnih blizanaca u poboljšanju upravljanja zdravljem srca. Elgammal i sur. (2025), *Journal of Big Data*, CC BY 4.0.



Slika 3. Ilustracija okvira digitalnih blizanaca za upravljanje dijabetesom tipa 1 i tipa 2. Za dijabetes tipa 1, sustav integrira praćenje glukoze u stvarnom vremenu, zapise o primjeni inzulina i podatke o tjelesnoj aktivnosti kako bi optimizirao inzulinsku terapiju kontinuiranom obradom podataka i predviđanjem. Za dijabetes tipa 2, digitalni blizanač temeljen na strojnom učenju analizira očitavanja glukoze, unos hrane i biometrijske podatke 64 pacijenta tijekom 90 dana kako bi identificirao obrasce, omogućujući preciznu prehranu i optimizirano upravljanje lijekovima. Elgammal i sur. (2025), *Journal of Big Data*, CC BY 4.0.

„prediktivni” pristup. Međutim, nije sve idealno. Unatoč velikom potencijalu ove tehnologije, postoje i značajni izazovi. Jedan je od najvećih problema zaštita privatnosti podataka, budući da digitalni blizanci koriste iznimno osjetljive informacije. Osim toga, modeli moraju biti dovoljno precizni da bi se mogli koristiti u kliničkoj praksi, što zahtijeva opsežna istraživanja i validaciju. Tu su i visoki troškovi razvoja koji ograničavaju širu primjenu. Dodatni izazov predstavlja i potreba za standardizacijom podataka te integracijom različitih sustava unutar zdravstvenih ustanova. Bez toga je teško postići punu funkcionalnost digitalnih blizanaca u praksi.

Budućnost medicine?

Iako su digitalni blizanci još uvijek u fazi razvoja, njihov je potencijal ogroman. U budućnosti bi mogli postati standardni alat u medicini, omogućujući liječnicima da prije donošenja odluke testiraju različite scenarije na virtualnom pacijentu. To bi moglo značajno unaprijediti sigurnost i učinkovitost liječenja. Osim toga, očekuje se da će daljnji razvoj umjetne inteligencije i dostupnost sve većih količina podataka dodatno ubrzati njihovu početak njihove primjene.

Digitalni blizanci mogli bi imati ključnu ulogu u razvoju potpuno personaliziranog pristupa medicini, gdje se svaki terapijski plan temelji na jedinstvenim osobinama pojedinog pacijenta.

Korak prema medicini budućnosti

Digitalni blizanci predstavljaju jedan od najuzbudljivijih razvoja moderne medicine. Iako još uvijek nisu dio svakodnevne kliničke prakse, već sada pokazuju kako bi medicina mogla izgledati u budućnosti, preciznija, sigurnija i u potpunosti prilagođena pojedincu. Njihova primjena ima potencijal smanjiti broj komplikacija, poboljšati ishode liječenja i omogućiti racionalnije korištenje zdravstvenih resursa.

Pitanje više nije hoće li virtualni pacijent pomagati liječiti stvarnog, već kada će to postati standard.

Izvori:

1. Ringeval M, Etindele Sosso F, Cousineau M, Paré G. Advancing health care with digital twins: meta-review of applications and implementation challenges. *J Med Internet Res*. 2025;27:e69544.
2. Tudor BH, Shargo R, Gray GM. A scoping review of human digital twins in healthcare applications and usage patterns. *NPJ Digit Med*. 2024.
3. Mallet Machado T, Tobal Berssaneti F. Literature review of digital twin in healthcare. *Heliyon*. 2023.
4. Nadeem M, Kostic S, Dornhöfer M, Weber C, Fathi M. A comprehensive review of digital twin in healthcare in the scope of simulative health-monitoring. *PLoS One*. 2025;20:e11705329.