

Die impak van kunsmatige intelligensie, generatiewe kunsmatige intelligensie en robotika op gesondheidsorg: Sal dokters oorbodig word?

Malcolm de Roubaix

Malcolm de Roubaix, Departement Filosofie, Universiteit Stellenbosch

Opsomming

Ek ondersoek die transformerende impak van kunsmatige intelligensie (KI) en robotika op die gesondheidsorgsektor, en bespreek spesifiek die potensiaal van KI om mediese praktyk, die lewering van gesondheidsorg en geneesmiddelontwikkeling radikaal te omvorm.

Oorsig van industriële revolusies: Ek gee 'n uiteensetting van die vordering deur verskeie industriële revolusies, en beklemtoon hoe elkeen die rol van arbeid en kapitaal verskuif het wat gelei het tot verhoogde meganisering, outomatisering van produksie en radikale maatskaplike evolusie.

Vierde industriële revolusie (4IR): Meer bepaald smelt fisiese, digitale en biologiese tegnologieë saam, wat 'n beduidende impak op produksiestelsels en die daaglikse lewe het, ook in die biomediese veld.

Vooruitgang in KI: Die snelle evolusie van 4IR word beklemtoon, en die vermoë om menslike intelligensie na te boots en komplekse probleme op te los wat verskeie sektore, insluitend gesondheidsorg, toenemend transformeer.

GKI in gesondheidsorg: Generatiewe KI (GKI) word 'n sleutelspeler in geneesmiddelontwikkeling wat prosesse soos molekulêre modellering en kliniese proewe verbeter en soodoende die skeep van nuwe medikasie bespoedig en kostes verlaag.

Verpersoonlikte middels: 4IR-tegnologie maak voorsiening vir pasgemaakte behandelingsplanne en geneesmiddels gebaseer op individuele pasiëntdata, wat gesondheidsorguitkomst aansienlik kan verbeter en nuwe-effekte verminder.

KI in diagnostiek: KI verbeter diagnostiese akkuraatheid deur verbeterde beeldontleding en die vermoë om sintetiese mediese beelde te genereer, en dataontleding wat vroeë siekteopsporing vergemaklik.

Uitdagings in implementering: Ek spreek kommer uit rakende dataprivaatheid, etiese oorwegings en die behoefte aan volgehoue kundige menslike oorsig om vals data (konfabulasie) te identifiseer, en beveel regulatoriese raamwerke aan om KI se integrasie in gesondheidsorg te lei.

Toekomsvooruitsigte: Die potensiaal vir KI om gesondheidsorglewering verder te vernuwe, insluitend persoonlike behandelings en verbeterde pasiëntmonitering, word bespreek, tesame met die voortdurende uitdagings wat die uitwissing van siektes in die gesig staar.

Trefwoorde: dataprivaatheid; diagnostiek; generatiewe KI (GKI); gesondheidsorg; kunsmatige intelligensie (KI); mediese beelding; medisyne-ontwikkeling; robotika in geneeskunde; verpersoonlikte geneesmiddels; vierde industriële revolusie (4IR)

The impact of artificial intelligence (AI), generative artificial intelligence (GAI), and robotics on healthcare: Will doctors become redundant?

Summary

I explore the transformative impact of artificial intelligence (AI) and robotics on the healthcare sector and specifically discuss the potential of AI to radically reshape medical practice, healthcare delivery, and drug development.

Overview of industrial revolutions: I outline the progress made by several industrial revolutions, highlighting how each shifted the role of labour and capital, leading to increased mechanisation and automation of production.

Fourth industrial revolution (4IR): More specifically, physical, digital and biological technologies are merging, which has a significant impact on production systems and daily life, including in the biomedical field.

Advancements in AI: The rapid evolution of 4IR is emphasised, and the ability to mimic human intelligence and solve complex problems that are increasingly transforming various sectors, including healthcare.

Generative AI (GAI) in healthcare: GAI is becoming a key player in drug development that improves processes such as molecular modelling and clinical trials, thereby speeding up the creation of new medications and reducing costs.

Personalised drugs: 4IR technology allows for customised treatment plans and cures based on individual patient data, which can significantly improve healthcare outcomes and reduce side-effects.

AI in diagnostics: AI improves diagnostic accuracy through improved image analysis and the ability to generate synthetic medical images, and data analysis that facilitates early disease detection.

Challenges in implementation: I address concerns regarding data privacy, ethical considerations and the need for continued expert human review to identify false data – confabulation – and regulatory frameworks to guide the integration of AI in healthcare.

Future outlook: The potential for AI to further innovate healthcare delivery, including personalised treatments and improved patient monitoring, is discussed, along with the ongoing challenges facing disease eradication.

Abstract

The document explores the transformative impact of artificial intelligence (AI) and robotics on the healthcare sector, specifically discussing the potential of AI to revolutionise medical practice and drug development. It begins with an overview of the progress made through various industrial revolutions, highlighting how each shifted the role of labour and capital, leading to increased mechanisation and automation of production.

Fourth industrial revolution (4IR): This revolution merges physical, digital and biological technologies, significantly impacting production systems and daily life, including the biomedical field. The rapid evolution of 4IR is highlighted, emphasising the ability to mimic human intelligence and solve complex problems that transform various sectors, including healthcare.

Advancements in AI: Generative AI is a key player in drug development, improving processes such as molecular modelling and clinical trials, thereby speeding up the creation of new medications and reducing costs.

Generative AI in healthcare: Generative AI is a key player in drug development, improving processes such as molecular modelling and clinical trials, thereby speeding up the creation of new medications and reducing costs. 4IR technology allows for customised treatment plans and cures based on individual patient data, significantly improving healthcare outcomes and reducing side-effects.

Future outlook: The potential for AI to further innovate healthcare delivery, including personalised treatments and improved patient monitoring, is discussed, along with the ongoing challenges facing disease eradication.

Personalised drugs: 4IR technology allows for customised treatment plans and cures based on individual patient data, significantly improving healthcare outcomes and reducing side-effects. AI improves diagnostic accuracy through improved image analysis and the ability to generate synthetic medical images, facilitating early disease detection.

Challenges in implementation: The document addresses concerns regarding data privacy, ethical considerations, and the need for regulatory frameworks to guide AI's integration into healthcare. The potential for AI to further innovate healthcare delivery, including personalised treatments and improved patient monitoring, is discussed, along with the ongoing challenges facing disease eradication.

Generative AI (GAI) applications in healthcare: One of the most promising applications of GAI lies in drug development. Traditional drug development is a long and expensive process, but GAI / machine learning accelerates this process by facilitating molecular structure modelling and improving the design, development, and testing phases of new drugs. AI-based models enable researchers to identify biological targets such as proteins or enzymes associated with specific diseases.

GAI in diagnostics: AI-driven diagnostics represent a well-established and advanced application. In radiology and image-based diagnostics, AI models are developed using extensive datasets of images, improving the resolution of medical images and the accuracy and speed of image reconstruction. Generative models can analyse medical images to detect and identify subtle abnormalities, facilitating more accurate and efficient disease detection.

Administrative tasks and clinical data collection: Other healthcare applications include machine learning models with prescriptive and predictive insights that handle organisational and administrative tasks such as patient and bed management, remote monitoring, and the creation of service schedules. Digitalised patient notes are an attractive method for data collection and mining, but must be operated with caution, considering inherent ethical issues such as confidentiality and privacy preservation.

Clinical decision-making and research: The integration of GAI into clinical decision-making systems involves using electronic health records and real-time data. This technology helps doctors make informed decisions by recognising patterns and risk factors that conventional methods might miss. Additionally, GAI fosters innovative research by generating hypotheses and simulations, promoting a multidisciplinary approach to medical challenges.

AI in medical robotics, nanotechnology and genetics: AI is radically transforming medical robotics, nanotechnology and genetics, significantly improving diagnosis, treatment and patient care. AI-driven robots enhance surgical precision, illustrated by the Da Vinci system, which reduces complications and recovery times. Nanoparticles deliver drugs directly to diseased cells, improving treatment efficacy with drastically reduced dosages and fewer side-effects. AI analyses genetic data to identify disease-related patterns and mutations, enabling early diagnosis and personalised treatment.

Future of healthcare with GAI: GAI will revolutionise healthcare by providing new methods to diagnose, treat and prevent diseases. As technology evolves, we can expect even more innovative applications, transforming healthcare delivery and experience. Machine learning significantly reduces the time needed for advancements in human development. With more use cases, experiments and applications, GAI predicts a future of cancer cures and the prediction and prevention of devastating pandemics.

Challenges and considerations: Despite the significant application and potential of GAI in healthcare, several challenges and considerations must be addressed. Generative AI models require substantial amounts of data for training, raising concerns about patient privacy and data security. The use of GAI in healthcare also raises ethical questions about bias, fairness and accountability. Clear regulatory frameworks are needed to oversee the development and deployment of GAI in healthcare.

Conclusion: AI integration in these fields promises precise treatments, early diagnosis and improved patient care. As AI develops, we expect further innovations in healthcare. Experts emphasise AI's potential impact on healthcare delivery, considering population sustainability, scientific progress and the digitalisation of health services.

GAI is revolutionising healthcare by speeding up drug development, enabling personalised healthcare and medications, improving medical imaging, and enhancing overall patient care. By harnessing the power of GAI, healthcare organisations can improve patient outcomes, reduce costs and drive innovation. As AI continues to advance, its impact on healthcare will continue to grow, promising a future where healthcare is more personalised, efficient and effective.

Keywords: artificial intelligence (AI); data privacy; diagnostics; drug development; fourth industrial revolution (4IR); generative AI (GAI); healthcare; medical imaging; personalised medicine; robotic surgery

1. Inleiding

Dit is die jaar 2050. Koos word wakker as gevolg van hewige bobuikpyn. Hy kou 'n teensuur-tablet sonder verligting en wonder: Is dit 'n hartaanval? Op 50 seker moontlik. Hoewel tabak reeds vyf jaar verbode is, rook hy steeds skelmpies en kry sy voorraad onwettig, nes sy kafeïen-ryke koffie (slegs kafeïenvrye koffie is wettig) in die sluikhandel. Hy staan op en skakel sy superrekenaar aan, druk met sy vinger op die Konsultasie-ikoon en selekteer die virtuele assistent wat hy wil raadpleeg: 'n man van sy ouderdom.

“Môre Koos, wat skort?”

“Erge pyn op die krop van my maag.”

“Mmm ... jy het 'n maagseer. Teensuur probeer?”

“Sonder sukses.”

“Op 'n skaal van 1 tot 10 ...?”

Koos val hom – dit – in die rede: “11.”

“O. Goed. Maak jou kardiologiepakkie oop en plak die EKG-plakker oor jou bors. Let mooi op na die instruksies.”

Die slimplakker skakel met Bluetooth met die rekenaar. Binne 30 sekondes kom die volgende instruksies: “EKG is normaal, polsspoed effe versnel. Jou hart is gesond. Gaan na die naaste gesondheidsorgkiosk – dis op die grondvloer van die Tygerberg Sentrum; sleutel die kode Y5273 in en volg die instruksies op die skerm. Sien jou daar!”

Koos maak so. Hy kyk diep in 'n retinale skandeerder, druk sy wysvinger in 'n opening, voel 'n prik aan sy vingerpunt en gaan staan voor 'n aftaster, en 'n minuut later verskyn die konsultasiebot op die skerm. Alle bloedtoetse is normaal, insluitende kardiaal ensiemtellings, maar daar is lug onder die diafragma. Sy peptiese ulkus het geperforeer en maaginhoud lek in sy buikholtte uit. Hy benodig dringende chirurgie om dit te heg.

By die hospitaal pons hy weer die kode in en word na 'n saal verwys, waar hy die eerste maal 'n lewende wese sien, 'n assistentverpleegster wat 'n groot tablet bring waarop hy 'n klomp vorms elektronies moet teken. Hy trek wegdoenbare teaterdrag aan, gaan lê op die selfaangedrewe trollie en word na die operasiekamers vervoer. Hier neem robotte oor: om die narkose toe te dien, om deur 'n paar outydsie tiekiegrootte snitte laparoskopies met fyn instrumente sy maag te heg.

Wetenskapfiksie, 'n verhaal uit die pen van Isaac Asimov? Dalk; neem egter kennis dat Asimov ook gesê het verbeeldingryke wetenskapfiksie is 'n beter voorspeller van die moontlikhede van die wetenskap as wetenskaplikes self. En let op hoeveel voorspellings vanuit wetenskapfiksie reeds bewaarheid is. Daarby ignoreer ons wetenskaplike moontlikhede tot ons eie nadeel, soos baie skrywers al opgemerk het. Nêrens is hierdie gedagtes meer van toepassing as in die mediese wetenskap nie, aangedryf deur vooruitgang in GKI, robotika, en telemedisyne. Hierdie tegnologieë het die potensiaal om die akkuraatheid, doeltreffendheid en toeganklikheid van gesondheidsorg te verbeter, wat uiteindelik pasiëntuitkomst en lewenskwaliteit kan verbeter – mits ons infrastruktuur en stelsels kan ontwikkel om dit optimaal te implementeer. Alhoewel hierdie voorspellings spekulatief is, bied hulle 'n opwindende blik op moontlikhede in geneeskunde en gesondheidsorglewering.

Koos se telekonsultasie is reeds moontlik. Virtuele-assistent-konsultasies word reeds tydens aanvanklike sifting en prioritering van pasiënte (*triage*) ingespan, en met opvolgondersteuning. Virtuele assistente verskaf berading aan pasiënte. Persoonlike konsultasies word deur KI-gedrewe stelsels ontleed en opgesom. Administratiewe take word deur KI behartig. Robotika word doeltreffend in operasies ingespan. Daar is haas geen aspek van gesondheidsorglewering wat óf reeds die impak van GKI gaan vryspring óf dit binne die afsienbare toekoms gaan doen nie.

Laat my allereers erken: Ek is geen kenner van GKI nie, en wil nog minder voorgee dat ek dit wel is. Ek is 'n geneeskundige met 'n lang loopbaan waartydens ek die mees fenomenale vernuwing meegemaak het. Ek het 'n deeglike agtergrond in geneeskundige navorsing, en bowenal is ek nuuskierig. Daarby glo ek dat die verdere integrasie van GKI in geneeskundige praktyk letterlik ongekende moontlikhede gaan ontsluit. Maar om dit te verwesenlik moet ons nou reeds kennis neem en beplan. Met dit in gedagte het ek 'n literatuurondersoek na die impak van GKI op gesondheidsorglewering onderneem en wonder ek tot watter mate masjiene mense in dié verband gaan vervang.

Die mensdom het reeds verskeie industriële revolusies beleef (Schwab 2016). Die groot, lomp en ondoeltreffende masjinerie van die eerste industriële revolusie is aangedryf deur water en stoom wat deur steenkoolverbranding gegenereer is, met uitgebreide negatiewe ekologiese en gesondheidsgevolge (Mohajan 2019). Werkers het lang ure in ongesonde omgewings verduur vir minimale lone wat rykdom vir enkelinge, die eienaars van fabriek ("kapitaal"), tot gevolg gehad het.

Die ontwikkeling van elektrisiteit en elektriese motore het die tweede industriële revolusie ingelui. Produksieskaal het teen 'n ongekende tempo toegeneem, aangedryf deur meganisasie en betreklik goedkoop krag wat in besoedelende steenkoolkragstasies opgewek is (Allan 2010). Arbeiders het lang skofte in ongesonde en gevaarlike steenkoolmyne gewerk teen minimale vergoeding, onder toestande soortgelyk aan, maar erger as, dié in fabriek waar produksie plaasgevind het. Produksie het toegeneem met minder menslike insette wat die skep van markte vir groot volumes produkte wat voorheen nie bestaan het nie, genoodsaak het (Jiang en Mengchen 2024). Gevolglik het die advertensiewese en bemarking na vore gekom. Die begunstigdes was weer eens kapitaal – nou "groot kapitaal".

Met die derde industriële revolusie, bekend as die digitale revolusie, het die ontwikkeling van elektronika en inligtingstechnologie die outomatisering en groot uitbreiding van produksie moontlik gemaak. Kapitaal het in 'n nuwe vorm verskyn: Microsoft, Apple, Google, Amazon – gesamentlik na verwys as “megakapitaal”. Die gewone werker is toenemend gemarginaliseer.

Die vierde industriële revolusie (4IR) bou voort op die digitale revolusie en word gekenmerk deur 'n samesmelting van tegnologieë wat die grense tussen die fisiese, digitale en biologiese sfeer laat vervaag. 4IR is uitsonderlik in terme van skaal, spoed en impak, en groei eksponensieel eerder as lineêr. Maatskappye soos Microsoft, Apple, Google en Amazon kom tot hul reg en omskep megakapitaal in “gigakapitaal”. Schwab (2016) beskryf hierdie revolusie as ontwrigtend nie net vir produksie en bestuur nie, maar ook vir staatsbestuur en persoonlike lewens.

Terwyl 4IR hoofsaaklik nuwe en revolusionêre produksiestelsels raak, verteenwoordig dit baie meer. Dit dui op die integrasie van tegnologie en biologie, wat ons lewens op ongekende maniere beïnvloed, insluitend in die biomediese sfeer. Die potensiaal van miljarde mense wat deur mobiele toestelle verbind is, met ongeëwenaarde verwerkingskrag, bergingskapasiteit en toegang tot inligting, is grensloos. Hierdie geleenthede sal verder versterk word deur opkomende tegnologiese deurbrake in velde soos KI, robotika, die internet van dinge, outonome voertuie, 3D-drukwerk, nanotegnologie, biotegnologie, materiaalwetenskap, energieberging en kwantumrekenaars – op wyses en gemik op toepassings tans nog ondenkbaar (Schwab 2016; Hamad en Jawad 2024).

2. Kunsmatige intelligensie (KI)

KI is 'n prominente toepassing van 4IR. Superrekenaarstelsels wat ongekende vermoëns het om menslike intelligensie na te boots, word spesifiek geprogrammeer om gevorderde probleme op te los. Hierdie stelsels ontwikkel teen 'n buitengewone, versnellende tempo, die beste vergelykbaar met evolusionêre patrone. Elke opeenvolgende stadium bou voort op die beste elemente van sy voorgangers. George Moore se bekende stelling van 1965 het voorspel dat die kapasiteit van stelsels (die aantal transistors in 'n geïntegreerde stroombaan) vir die afsienbare toekoms elke 12 maande sal verdubbel (later verleng tot 24 maande), terwyl koste stabiel sal bly of selfs sal daal.¹ Dit was grootliks in die kol. In die moderne era versnel vooruitgang steeds eksponensieel, met toepassings wat ons lewens subtiel verander.

3. Digitale inklusiwiteit en geregtigheid

Om die voordele van die 4IR ten volle te benut is vinnige, betroubare en bekostigbare toegang tot die digitale ryk noodsaaklik. Gelukkig erken regerings en diensverskaffers hierdie noodsaaklikheid, wat dienste vir baie verbruikers meer bekostigbaar maak.

Slimfone, waardeur die meeste dienste verkry kan word, het ook toenemend bekostigbaar en slimmer geword. Terselfdertyd is dit noodsaaklik vir verbruikers om nuwe digitale vaardighede aan te leer. Digitale inklusiwiteit, wat beide toegang en die vermoë om tegnologie vaardig te gebruik (digitale geletterdheid) insluit, is van kritieke belang.

Sonder hierdie vaardighede bly optimale deelname aan sosiale en ekonomiese aktiwiteite, sowel as die benutting van huidige en toekomstige gesondheidsorg vernuwings, onbereikbaar, met gevolglike risiko's verbonde aan onbewuste tegnologiegebruik.

Digitale geregtigheid onderstreep die belangrikheid daarvan om nie individue of groepe uit te sluit op grond van faktore soos geslag, ras en etnisiteit, taalvaardigheid, inkomste en finansiële vermoë, opvoedkundige geleenthede, intellektuele vermoëns, ligging (stedelik of landelik), gestremdhede en ouderdom nie.² Toegang tot digitale hulpbronne onder Suid-Afrikaners het aansienlik toegeneem. Volgens die Statistiek SA Algemene Huishoudelike Oorsig van 2023³ het internettoegang vir alle huishoudings, hetsy via slimfone, werk of vaste verbindings, van 28% in 2010 tot 78,6% teen 2023 gestyg. Hierdie statistiek weerspieël egter nie noodwendig rekenaargeletterdheid nie.⁴

4. Generatiewe kunsmatige intelligensie (GKI)

(Hierdie gedeelte is ter wille van illustrasie m.b.v. die GKI-toepassing Copilot geskep en verder verwerk.)

GKI verteenwoordig 'n gevorderde vorm van masjienleer wat masjiene in staat stel om nie alleen komplekse take te verrig nie, maar ook oorspronklike inhoud te skep. GKI is 'n vorm van KI wat ontwerp is om inhoud soos teks, beelde, musiek en kode te produseer. Dit funksioneer deur uitgebreide datastelle te ontleed om patrone te identifiseer wat dit vervolgens gebruik om oorspronklike materiaal te skep. In plaas daarvan om net bestaande data te ontleed, gebruik dit gevorderde algoritmes en groot hoeveelhede data om nuwe en oorspronklike inhoud te genereer. Dit werk dikwels met neurale netwerke soos groot taalmodelle, wat patrone in data herken en dan nuwe teks of beelde skep wat betekenisvol en nuttig is.

'n GKI-model word "opgelei" deur die invoer van groot hoeveelhede teks, beelde of ander inhoud. Dit "leer" om die strukture, patrone en kontekste wat in die data teenwoordig is, te herken. GKI-modelle gebruik neurale netwerke, veral transformatorgebaseerde modelle soos GPT (Generative Pre-trained Transformer). Neurale netwerke is die kern van GKI, boots die menslike brein na, en is ontwerp om patrone in groot hoeveelhede data te identifiseer. Dit help KI om te leer hoe taal gestruktureer is of hoe beelde gevorm word, wat noodsaaklik is vir inhoudskepping. Hierdie netwerke boots die manier na waarop die menslike brein patrone van inligting verwerk.

Wanneer 'n versoek gerig word, gebruik KI sy aangeleerde patrone om 'n "voorspelling" te maak gebaseer op statistiese verdelings waar die voorspelling die verwagte waarde verteenwoordig. So vorm nuwe teks, beelde of musiek op grond van die instruksies wat dit ontvang. KI kan verder verfyn word vir spesifieke doeleindes. Dit beteken dat 'n model vir algemene skryfwerk anders kan werk as een wat spesifiek ontwerp is vir byvoorbeeld vertaling, of bepaalde toepassings in gesondheidsorg.

In taalmodelle soos GPT gebruik neurale netwerke miljarde parameters om nuwe teks te vorm gebaseer op kontekstpatrone. Neurale netwerke help GKI om betekenisvolle en relevante resultate te lewer. Dit kan die struktuur van gesprekke herroep as die toepassing (waar die taalmodel gebruik word) ontwerp is om geheue in te sluit en leer verbeterde maniere om probleme op te los

indien dit daarvoor opgestel is (sogenaamde versterkingsleer, *reinforcement learning*). Omdat neurale netwerke voortdurend leer, kan GKI hul styl en inhoud verbeter op grond van terugvoer of nuwe data.

Soos die brein, bestaan neurale netwerke uit “neurone” wat data verwerk. Hierdie neurone is in verskillende lae georganiseer. Die “invoerlaag” ontvang rou data (bv. teks). “Verborge lae” verwerk die data deur patrone te identifiseer en besluite te neem. Die “uitvoerlaag” lewer ’n voorspelling of skep nuwe inhoud. Elke verbinding tussen neurone het ’n “gewig” wat bepaal hoe belangrik ’n spesifieke stuk data is. ’n “Aktiveringsfunksie” help om te bepaal watter neurone ’n sein moet stuur en watter dormant moet bly.

Neurale netwerke leer deur foute reg te stel. Dit werk soos ’n student wat na ’n toets teruggaan en verkeerde antwoorde verbeter. Die netwerk pas sy gewigte aan totdat dit beter voorspellings maak. ’n “Diep neurale netwerk” het baie verborge lae en kan gevorderde probleme oplos, soos taalverwerking en die skep van beelde.

GKI vind wye toepassings in verskeie velde. In gesondheidsorg dra dit by tot vernuwende oplossings wat byvoorbeeld as digitale medediagnostici en -navorsers funksioneer en sodoende gesondheidsorgpraktyke verbeter (Chen en Esmaeilzadeh 2024).

5. Transformasie van gesondheidsorg met GKI

Die gesondheidsorgbedryf het deurgaans die leiding geneem in die toepassing van tegnologiese vernuwing. Tans veroorsaak KI en verwante tegnologieë soos masjienleer, diep leer en GKI ’n revolusie in gesondheidsorglewering, -bestuur en -pasiëntervaring. Ons is slegs aan die begin van hierdie transformerende tegnologiese era, en nuwe toepassings wat vir tradisionele medici ondenkbaar was of steeds is, word teen ’n toenemende tempo beskikbaar gestel.

6. Die opkoms van GKI in gesondheidsorg

GKI sluit ’n kategorie van KI-modelle in wat nuwe, realistiese datastelle kan genereer wat met hul opleidingsdata ooreenstem. Anders as tradisionele KI, wat fokus op ontleding en voorspelling, produseer GKI nuwe inhoud en sintetiese data. Die impak van GKI in gesondheidsorg is beide dinamies en belowend, met die voortdurende evolusie van geneeskundige navorsing en tegnologie wat menslike kundigheid en KI-ondersteuning harmoniseer om progressiewe, persoonlike en hoëgehaltepasiënt sorg te bevorder.

7. Spesifieke GKI-toepassings in gesondheidsorg

Een van die belowendste toepassings van GKI lê in geneesmiddelontwikkeling. Tradisionele geneesmiddelontwikkeling is ’n lang en duur proses. Dit kan 11 tot 16 jaar neem en \$1–2 miljard kos om ’n nuwe middel op die mark te plaas. GKI/masjienleer versnel hierdie proses deur molekulêre struktuurmodellering te fasiliteer en die ontwerp-, ontwikkeling- en

toetsfases van nuwe middels te verbeter en te verkort. KI-gebaseerde modelle stel navorsers in staat om biologiese teikens te identifiseer, soos proteïene of ensieme, wat met spesifieke siektes geassosieer is (Chakraborty, Bhattacharya e.a. 2024). Gevorderde tekening maak die ontwerp van medisyne wat aangepas is om hierdie teikens doeltreffend te beïnvloed, moontlik.

Alle nuwe middels ondergaan streng kliniese toetsing om hul toepaslikheid, veiligheid, doeltreffendheid en veralgemeenbaarheid te bevestig. GKI kan kliniese navorsing simuleer deur sintetiese pasiëntdata te gebruik, wat die behoefte aan uitgebreide menslike proewe verminder en die goedkeuringsproses bespoedig.⁵ Boonop kan KI-modelle verbindings se chemiese eienskappe en bioaktiwiteit voorspel, wat insigte verskaf rakende potensiële nadelige effekte gebaseer op data uit vorige studies en databasisse. GKI ondersteun dus versnelde eksperimentering en waarneming deur gesimuleerde kliniese proewe, volgordebepaling en patroonopsparing, en verkort sodoende die evalueringstydraamwerk. Dit dra ook by tot onkonvensionele terapieë deur nuwe kandidaatmiddels te skep, met molekulêre strukture met gewenste eienskappe, wat moontlik tot meer effektiewe en doelgerigte behandelings kan lei. KI kan geneesmiddelinteraksies binne die menslike liggaam voorspel, wat help om dosering te optimaliseer en nuwe-effekte te verminder deur op individuele eerder as op 'n groot aantal kandidate te fokus.⁶

Hierdie metodologieë maak geneesmiddelontwikkeling vinniger, meer koste-effektief en presies, wat uiteindelik uitstekende behandelings vir verskeie siektes lewer.

Die generering van nuwe molekulêre struktuurmodelle maak staat op 'n kombinasie van rekenaarsimulasies, KI en eksperimentele data. Sleutelmetodes sluit in:

7.1 Kwantummeganika en molekulêre dinamika

Simulasies gebaseer op kwantummeganika voorspel interaksies tussen atome en molekules, terwyl molekulêre-dinamika-modelle molekulêre beweging en stabiliteit oor tyd ontleed (Shen en Yang 2018).

7.2 KI-gedrewe voorspellings

KI-modelle soos AlphaFold voorspel proteïenstrukture deur patrone in bestaande biologiese data te identifiseer. Hierdie tegnologie is veral waardevol vir die ontwerp van nuwe middels en terapeutiese proteïene.⁷

7.3 Eksperimentele metodes

Tegnieke soos X-straaldiffraksie en krio-elektronmikroskopie bepaal driedimensionele molekulêre strukture, wat geïntegreer word met KI-modelle vir akkurate voorspellings.⁸

7.4 Rekenaargegenereerde molekulêre ontwerp

Algoritmes ontwerp nuwe molekulêre strukture vir spesifieke biologiese funksies wat deurslaggewend is in die ontwikkeling van nuwe middels en biologiese materiale (Niazi en Mariam 2023).

Hierdie benaderings versnel die skep van nuwe molekules en verbeter voorspellingsakkuraatheid in biochemie en farmakologie. Sodra data beskikbaar is, integreer dit in omvattende kennis-databasisse, met KI-gedrewe voorspellingsmodelle en rekenaarsimulasies wat interaksies tussen molekulêre kandidate en stowwe wat kenmerkend is van siekte, voorspel. Dit sluit in die ontwerp van nuwe molekulêre strukture met optimale bindingseienskappe, die verhoging van medikasie-doeltreffendheid en die vermindering van newe-effekte. GKI kan nuwe chemiese strukture voorstel wat aangepas is vir unieke pasiënt- biomolekulêre omgewings.

Na afloop van die ontwerpfasie word geselekteerde molekulêre kandidate in laboratoriums gesintetiseer met behulp van moderne sintetiese chemie en biotegnologiese tegnieke.

Gedurende die vervaardiging verseker streng gehaltebeheer die veiligheid, stabiliteit en doeltreffendheid van middels. Dosis en vorm (bv. tablette, infusies) word noukeurig aangepas om in pasiënte se metaboliese behoeftes te voorsien en aan hulle kliniese vereistes te voldoen.

Die laaste stap behels intensiewe kliniese toetsing, dikwels deur in vitro- en kleiner persoonlike studies. Hierdie toetsstadiums gee kritiese terugvoer oor middelgedrag in lewende stelsels, wat die nodige aanpassings moontlik maak voor wydverspreide toediening. Hierdie deurlopende siklus van ontwerp, toetsing en optimalisering verseker dat behandelings unieke biologiese toestande effektief aanspreek.

8. Wat hou die toekoms van KI en middelontwikkeling in?

GKI transformeer terapeutiese toepassings, versnel geneesmiddelontwikkeling en voorspel belowende geneesmiddeleikens en -kandidate. Dit kan reaksiemerkers identifiseer en vinnig persoonlike behandelingsplanne en middels ontwikkel. Hierdie tegnologie sal die algehele koste van geneesmiddelontwikkeling verminder, wat meer nuwe medisyne vinniger aan pasiënte beskikbaar stel, met talle nuwe mediese tegnologiemaatskappye wat juis nou gestig en deel van hierdie revolusie word.

Voorbeelde van middels wat m.b.v. GKI ontwikkel is, sluit in:

Abaucin: As gevolg van die tekort aan nuwe antibiotika en die vinnige ontwikkeling van weerstand teen bestaande middels word die behandeling van infeksies meer uitdagend. Abaucin is 'n kragtige nuwe KI-ontwikkelde eksperimentele antibiotikum wat ontwerp is om die gevaarlike “superorganisme” (*superbug*) *Acinetobacter baumannii* te bestry. Die proses is begin deur die doeltreffendheid van duisende middels te toets. Hierdie inligting is gebruik om KI op te lei om 'n effektiewe middel te ontwikkel (Awan, Zainab e.a. 2024). (Sien ook Wikipediablad <https://en.wikipedia.org/wiki/Abaucin>, asook, vir algemene inligting, <https://af.shaip.com/blog/transforming-healthcare-with-generative-ai-key-benefits-applications/?citationMarker=43dcd9a7-70db-4a1f-b0ae-981daa162054>.)

Target X: Insilico Medicine het met sy GKI-platform 'n middel bekend as Target X geskep, nou in fase 1- kliniese proewe, om idiopatiese longfibrose te behandel.⁹

VRG-50635: Verge Genomics, 'n KI-geneesmiddelontwikkelingsmaatskappy, het sy KI-platform Converge gebruik om 'n nuwe verbinding, VRG-50635, vir ALS-behandeling te ontwerp deur menslike datapunte te ontleed. Die datapunte bevat inligting oor die brein en rugmurgweefsel van pasiënte met neurodegeneratiewe siektes soos Parkinsons, ALS (amiotrofiese laterale sklerose) en Alzheimers. Die platform het eers die PIKfyve-ensiem geïdentifiseer as 'n potensiële teiken vir ALS en daarna VRG50635 as 'n belowende inhibeerder van PIKfyve en potensiële geneesmiddelkandidaat vir ALS-behandeling. Die middel is tans in 'n fase 1- kliniese proef om die doeltreffendheid daarvan te bepaal.¹⁰

Excientia: Die mediesetnologiemaatskappy Excientia het die eerste KI-ontwerpte molekule vir immuno-onkologiebehandeling ontwikkel (kankerbehandeling wat die liggaam se immuunstelsel terapeuties benut), wat tans kliniese evaluering ondergaan. Dit is gerig op verskeie siektes, insluitend sekere kankers, infeksies en bloedsiektes.¹¹

De novo-teenliggaampies: Absci, 'n GKI-middelontwikkelingsmaatskappy, gebruik sg. "nulskoot"-GKI om nuwe teenliggaampies deur rekenaarsimulasie te skep. Nulskootleer beteken dat die KI-model nie eksplisiet op die huidige insetinligting tydens die opleidingsfase getoets is nie. Daarom kan hierdie proses nuwe teenliggaamontwerpe onafhanklik (*de novo*) en baie vinniger as standaard-KI-metodes genereer. *De novo*-terapeutiese teenliggaampies wat deur KI gegenereer word, verminder die tyd wat nodig is om nuwe middels te ontwikkel van tot ses jaar tot net 18 tot 24 maande, wat die waarskynlikheid van kliniese sukses verhoog. Die maatskappy se tegnologie kan elke week 3 miljoen KI-gegenereerde ontwerpe toets en verifieer. Hierdie nuwe ontwikkeling kan onmiddellik nuwe terapieë aan elke pasiënt lewer, wat 'n beduidende verandering aandui.¹²

9. Implanteerbare-middel-lewering

Dit sluit in biodegradeerbare implantate wat eintlik as reservoirs dien en pompe wat op terugvoerstelsels werk om byvoorbeeld insulien n.a.v. intern gemete bloedglukosevlakke vry te stel. Verskeie draagbare stelsels is beskikbaar. Die jongste stelsel wat effektief was in proefdiere, behels die kombinasie van menslike pankreasselle en tegnologie in 'n mini-implantaat om insulien n.a.v. intydse bloedglukosemonitering af te skei (Krishnan, Liu e.a. 2023). Sien ook *MIT News*, 18 September 2023. An implantable device could enable injection-free control of diabetes. <https://news.mit.edu/2023/implantable-device-enable-injection-free-control-diabetes-0918>, asook Quest Diagnostics se aankondiging op hul webblad (geen datum): The future of precision medicine begins today <https://www.questdiagnostics.com/our-company/actions-insights/2016/future-precision-medicine-begins-today>.

10. Verpersoonliking van behandeling

Een van die belowendste toepassings van GKI is om persoonlike behandelingsplanne voor te stel en pasgemaakte medikasie te ontwerp. Deur 'n pasiënt se genetiese samestelling, mediese geskiedenis en lewenstyl te ontleed kan GKI die doeltreffendste behandelings en terapieë aanbeveel. Daarbenewens kan revolusionêre persoonlike middels geskep word wat aangepas is vir individuele behoeftes deur uitgebreide pasiëntdataontleding.¹³ Hierdie persoonlike benadering verbeter uitkomst en verminder nuwe-effekte, en ondersteun sodoende meer presiese en doeltreffende pasiëntorg.

Gevorderde biotegnologie, genomiese dataontleding, rekenaargedrewe modelle en tradisionele sintetiese prosesse konvergeer in die ontwerp en vervaardiging van persoonlike medikasie. Die proses begin met die versameling van omvattende pasiëntinligting, insluitend genetiese profiel, kliniese geskiedenis, biomerkers en lewenstylfaktore.

Genoomvolgordebepaling en farmakogenomika maak die identifisering van genetiese variasies moontlik wat medikasie-reaksies beïnvloed en die grondslag vir pasgemaakte behandelingsplanne vorm. Die uitgangspunt van hierdie strategie is dat daar konsepueel geen “tipiese pasiënt” bestaan nie, maar dat elkeen biologies uniek is.

11. Diagnostiese toepassings

KI-gedrewe diagnostiek verteenwoordig ’n goed gevestigde en gevorderde toepassing. In radiologie en beeldgebaseerde diagnostiek (soos magnetiese-resonansie- en rekenaartomografie-skanderings) word KI-modelle m.b.v. uitgebreide datastelle van beelde ontwikkel. Sodoende word die resolusie van mediese beelde en die akkuraatheid en spoed van beeldrekonstruksie verbeter om interne organe en weefsels in meer besonderhede te visualiseer. Generatiewe modelle is in staat om mediese beelde, soos X- strale en MR (magnetiese resonansie), te ontleed om die opsporing en identifisering van subtiele abnormaliteite wat deur die menslike oog misgekyk kan word, te vergemaklik en siektes en afwykings meer akkuraat en doeltreffend op te spoor as wat menslik moontlik is. Boonop kan generatiewe modelle sintetiese mediese beelde skep vir die opleiding van KI-algoritmes, wat afhanklikheid van werklike pasiëntdata verminder en pasiëntprivaatheid beskerm.

Hierdie vermoëns maak vroeë siekte-opsporing en doeltreffende diagnose moontlik. IBM Watson Genomic gebruik byvoorbeeld kognitiewe berekening vir vinniger en doeltreffender genoomgedrewe volgordebepaling (Quest diagnostics).

12. Administratiewe take en kliniese-data-versameling en -berging

Ander gesondheidsorgtoepassings sluit in masjienleermodelle met voorskriftelike en voorspellende insigte wat organisatoriese en administratiewe take hanteer, soos pasiënt- en bedbestuur, afstandmonitering en die skep van diensskedules. Gedigitaliseerde pasiëntnotas is ’n aantreklike metode om data te versamel en te ontgin, maar moet met omsigtigheid en inagneming van die inherente etiese risiko’s soos bewaring van vertroulikheid en privaatheid bedryf word (Bhuyan, Sateesh e.a. 2025).

13. Kliniese besluitneming en navorsing

Die integrasie van GKI in kliniese besluitnemingstelsels behels die gebruik van elektroniese gesondheidsrekords en intydse data. Hierdie tegnologie help dokters om ingeligte besluite te neem deur patrone en risikofaktore wat konvensionele metodes kan miskyk, te herken. Boonop bevorder GKI vernuwende navorsing deur hipoteses en simulaties te genereer, wat ’n multi-

dissiplinêre benadering tot mediese uitdagings bevorder, ons begrip en behandeling van siektes omvorm, en die weg baan vir unieke mediese profiele en protokolle wat in spesifieke pasiënt-behoefte voorsien. Dit kom neer op die skep van 'n “digitale tweeling” van die betrokke persoon (Reddy 2024; Bishen en Khedkar 2024).

14. KI in mediese robotika, nanotegnologie en genetika

KI omvorm mediese robotika, nanotegnologie en genetika radikaal wat diagnose, behandeling en pasiënt-sorg aansienlik verbeter.

14.1 Mediese robotika

KI-gedrewe robotte verbeter chirurgiese presisie, geïllustreer deur die Da Vinci-stelsel, wat komplikasies en hersteltye verminder. Breintoestelkoppeling vir mobiliteitsverbetering en ledemaatgebruik bestaan reeds. Outonome robotte dien medikasie toe, monitor vitale tekens (soos EKG en asemhaling) en verskaf basiese sorg, wat gesondheidsorgwerkers se las kan verlig. Robotiese galblaasverwydering is reeds aanvaarde praktyk in baie sentra, en volgens koerantberigte is die eerste totaal robotiese galblaasverwydering op 'n menslike pasiënt onlangs in die VK uitgevoer (Brodie en Vasdev 2018; Chowbey, Dewan e.a. 2023).

14.2 Mediese nanotegnologie

Nanodeeltjies lewer middels direk aan siek selle, wat die doeltreffendheid van die behandeling verbeter met drasties verlaagde dosering en minder nuwe-effekte wat dikwels aan dosering gekoppel is. KI ontwerp beter nanomateriale vir medikasieafleweringstelsels, diagnostiese toestelle en weefselmanipulasie, en die doelgerigte aflewering van middels waar hulle nodig is (Patil, Mehta en Guvva 2008; Malik, Muhammad en Waheed 2023).

14.3 Mediese genetika

KI ontleed genetiese data om siekteverwante patrone en mutasies te identifiseer, wat vroeë diagnose en persoonlike behandeling moontlik maak. Dit help met die ontwikkeling van geenterapie deur effektiewe geenredigeringsmetodes te identifiseer (Ozcelik, Dundar, Yildirim e.a. 2024).

15. Die toekoms van gesondheidsorg met GKI

GKI sal 'n omwenteling in gesondheidsorg teweeg bring deur nuwe metodes te verskaf om siektes te diagnoseer, te behandel en te voorkom. Soos tegnologie ontwikkel, kan ons selfs meer vernuwende toepassings verwag wat die lewering en ervaring van gesondheidsorg toenemend sal transformeer. Masjienleer verminder die tyd wat nodig is vir vooruitgang in menslike ontwikkeling aansienlik. Met meer gebruiksevalle, eksperimente en toepassings voorspel GKI 'n toekoms van kankergeneesmiddels en die voorkoming van verwoestende pandemies, o.a. ook danksy eenvoudige slimfoontoepassings.

Werklike en potensieële deurbrake en toepassings sluit in genetiese redigering vir die voorkoming en genesing van siektes en oorerflike toestande, immunologiese behandelings vir kanker, mikrobioomterapieë en individueel geteikende medisyne. KI se rekenaarkrag oorskry menslike vermoëns ver en vorder vinnig. KI se rol in die ontwerp van nuwe proteïenmolekules is van besondere belang.

KI-gedrewe virtuele assistente kan pasiënte persoonlike ondersteuning en leiding bied, vrae beantwoord, afsprake reël en hul gesondheid monitor. GKI kan virtuele terapeute en beraders skep wat pasiënte enige tyd en enige plek toegang tot geestesgesondheidsondersteuning bied. Hierdie ontwikkeling moet egter met omsigtigheid toegepas word vanweë inherente risiko's. Masjienleermodelle ontleed liggaamsbewegings en gedrag en beveel lewenstylveranderinge aan wat algehele welstand bevorder. Draagbare toestelle en toepassings kan intydse terugvoer gee om postuur te verbeter en fisieke aktiwiteit aan te moedig. Besluitnemingsalgoritmes en KI-algoritmes verwerk gesondheidsdata om byvoorbeeld die aanvang van diabetes te voorspel deur faktore soos ouderdom, lewenstyl en dieet te ontleed.¹³ Hierdie algoritmes kan ook lewersiektes akkuraat opspoor.

Masjienleer outomatiseer die bywerking van elektroniese gesondheidsrekords, insluitend dié van vanlyn bronne via handskrifopsparing, om te verseker dat gesondheidswerkers betyds toegang tot gesentraliseerde pasiëntdata het.

16. Uitdagings en oorwegings

Ten spyte van die beduidende toepassing en potensiaal van GKI in gesondheidsorg, moet verskeie uitdagings en oorwegings aangespreek word. GKI-modelle benodig aansienlike hoeveelhede data vir opleiding, wat kommer wek oor pasiëntprivaatheid en datasekuriteit. Die gebruik van GKI in gesondheidsorg laat ook etiese vrae oor vooroordeel, billikheid en aanspreeklikheid ontstaan. Daar is 'n behoefte aan duidelike regulatoriese raamwerke om toesig te hou oor die ontwikkeling en ontplooiing van GKI in gesondheidsorg. Die integrasie van GKI in bestaande gesondheidsorgstelsels kan kompleks wees en aansienlike opleiding en belegging noodsaak. Data wat deur KI gegenereer word, moet met omsigtigheid en kundige toesig bestuur word, aangesien KI moontlik niebestaande data met wat bekend staan as hallusinasies (m.i. is die term *konfabulasie* meer gepas) kan aanvul. Menslike toesig en verifikasie bly onontbeerlik om veilige en betroubare gesondheidsorg te verseker, aangesien die sinergie tussen tegnologiese vooruitgang en menslike intuïsie van kardinale belang is. Daarbenewens moet meganismes ingestel word om enige konfabulasie op te spoor en aan te spreek.

Beide die verbruiker en die verskaffer van dienste hier bo bespreek sal vanselfsprekend deeglik opgelei en bemagtig moet word om hierdie modaliteite enigsins wyd en doeltreffend toe te pas. Daar rus dus 'n reuse verantwoordelikheid op onderrigsentra en mediese skole om huidige studente – die volgende generasie diensverskaffers – deeglik op te lei. Hoe die huidige geslag van (ouer) diensverskaffers bemagtig kan word, is egter 'n ope vraag, veral hier in Suid-Afrika. Dit kan nietemin nie agterweë gelaat word nie, sodat voordele nie verbeur word nie, en om uitbuiting te voorkom. Aan die ander kant is stelsels soos hierdie juis noodsaaklik in ontwikkelende lande met uitgestrekte landelike gebiede, en kan KI, indien doelgerig ontwikkel en korrek bestuur en aangewend, dalk die knoop vir 'n nasionale gesondheidstelsel deurhaak.

17. Gevolgtrekking

KI-integrasie op hierdie terreine beloop presiese behandelings, vroeë diagnose en verbeterde pasiëntsorg. Soos KI ontwikkel, verwag ons verdere vernuwings in gesondheidsorg. Kenners beklemtoon KI se potensiële impak op gesondheidsorglewering, met inagneming van bevolkingsvolhoubaarheid, wetenskaplike vooruitgang en digitalisering van gesondheidsdienste.

GKI is besig om 'n omwenteling in gesondheidsorg teweeg te bring deur geneesmiddel-ontwikkeling te bespoedig, persoonlike gesondheidsorg en medikamente moontlik te maak, mediese beelding te verbeter en algemene pasiëntsorg te verbeter. Deur die krag van GKI te benut kan gesondheidsorgorganisasies pasiëntuitkomst verbeter, koste verminder en vernuwing aandryf. Namate KI aanhou vorder, sal die impak daarvan op gesondheidsorg aanhou groei, met die belofte van 'n toekoms waar gesondheidsorg meer persoonlik, doeltreffend en effektief is. Let daarop dat KI-skeppings geen kopiëreg impliseer nie.

Ten spyte van vordering bly daar uitdagings om siektes soos MIV, malaria en tuberkulose uit te roei. KI se impak op gesondheidsbegrotings en arbeidskoste is belowend, veral met die bekendstelling van Nasionale Gesondheid Versekering (NGV). KI gekombineer met biomediese manipulerings kan moontlik NGV bekostigbaar maak binne huidige landwyse gesondheidsbegrotings.

Die moontlikhede en werklike vordering van GKI is fenomenaal en voorspel 'n transformerende toekoms in gesondheidsorg – mits ons bekwaam en bereid is om dit te benut.

En die antwoord op my tong-in-die-kies vraag in die opskrif? Natuurlik nie. Die dokter van die toekoms sal net moet aanpas en leer om KI-vernuwings te benut. So ook die pasiënt.

Bibliografie

Allen, R.C. 2010. The British Industrial Revolution in global perspective. *Keynes-ekonomielesing. Proceedings of the British Academy*, 167:199–224.

Awan, R.E., S. Zainab, F.J. Yousuf en S. Mughal. 2024. AI-driven drug discovery: Exploring abaucin as a promising treatment against multidrug-resistant *Acinetobacter baumannii*. *Health Sci Rep*, 7(6):e2150. DOI: 10.1002/hsr2.2150. PMID: 38841115; PMCID: PMC11150274.

Bhuyan, S.S., V. Sateesh, N. Mukul, A. Galvankar, A. Mahmood, M. Nauman, A. Rai, C. Bishen en P. Khedkar. 2024. Intelligent clinical trials: Using Generative AI to fast-track therapeutic innovations. WEF Witskrif, Desember 2024. https://reports.weforum.org/docs/WEF_Intelligent_Clinical_Trials_2024.pdf.

Bordoloi, K., U. Basu en J. Samuel. 2025. Generative artificial intelligence use in healthcare: Opportunities for clinical excellence and administrative efficiency. *J Med Syst*, 49(1):10. DOI: 10.1007/s10916-024-02136-1. PMID: 39820845; PMCID: PMC11739231.

Brodie, A. en N. Vasdev. 2018. The future of robotic surgery. *Ann R Coll Surg Engl*, 100:4–13 (Supplement 7). DOI: 10.1308/rcsann.supp2.4. PMID: 30179048; PMCID: PMC6216754.

Chakraborty, C., M. Bhattacharya, S. Pal en M.A. Islam. 2024. Generative AI in drug discovery and development: The next revolution of drug discovery and development would be directed by generative AI. *Ann Med Surg (London)*, 86(10):6340–3. DOI: 10.1097/MS9.0000000000002438. PMID: 39359753; PMCID: PMC11444559.

Chen, Y. en P. Esmaeilzadeh. 2024. Generative AI in medical practice: In-depth exploration of privacy and security challenges. *J Med Internet Res*, 26:e53008. DOI: 10.2196/53008. PMID: 38457208; PMCID: PMC10960211.

Chowbey, P., A. Dewan, A. Sharma, R. Khullar, V. Soni en M. Baijal. 2023. A review of the first 100 robotic cholecystectomies with a new cart-based surgical robot at a tertiary care centre. *J Minim Access Surg*, 19(3):390–4. DOI: 10.4103/jmas.jmas_184_22. PMID: 37282423; PMCID: PMC10449052.

Dash, A.K. en G.C. Cudworth II. 1998. Therapeutic applications of implantable drug delivery systems. *J Pharmacol Toxicol Methods*, 40(1):1–12. DOI: 10.1016/s1056-8719(98)00027-6. PMID: 9920528.

Goy, R., S. Nishtar en V.J. Dzau. 2019. WEF Insight report: Global future council on the future of health and healthcare 2016–2018. Health and healthcare in the Fourth Industrial Revolution. https://www3.weforum.org/docs/WEF__Shaping_the_Future_of_Health_Council_Report.pdf.

Hamad, B. en M. Jawad. 2024. The fourth industrial revolution: a historical and conceptual review. *Journal of Economics and Administrative Sciences*, 30:154–72. DOI: 10.33095/gh3a7g38.

Jiang, M. 2024. A review of the impacts of industrial revolutions in world history. *Communications in Humanities Research*, 39:233–8. <https://doi.org/10.54254/2753-7064/39/20242245>.

Krishnan, S.R., C. Liu, M.A. Bochenek, S. Bose, N. Khatib, B. Walters, L. O’Keeffe, L. Facklam, R. Langer en D.G. Anderson. 2023. A wireless, battery-free device enables oxygen generation and immune protection of therapeutic xenotransplants in vivo. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, 120(40):e2311707120. <https://doi.org/10.1073/pnas.2311707120>.

Malik, S., K. Muhammad en Y. Waheed. 2023. Emerging applications of nanotechnology in healthcare and medicine. *Molecules*, 28(18):6624. DOI: 10.3390/molecules28186624. PMID: 37764400; PMCID: PMC10536529.

Mohajan, H. 2019. The First Industrial Revolution: Creation of a new global human era. *Journal of Social Sciences and Humanities*, 5(4):377–87. <https://mpira.ub.uni-muenchen.de/96644>.

Niazi, S.K. en Z. Mariam. 2023. Computer-aided drug design and drug discovery: a prospective analysis. *Pharmaceuticals (Basel)*, 17(1):22. DOI: 10.3390/ph17010022. PMID: 38256856; PMCID: PMC10819513.

Ozcelik, F., M.S. Dundar, A.B. Yildirim, G. Henehan, O. Vicente, J.A. Sánchez-Alcázar, N. Gokce, D.T. Yildirim, N.N. Bingol, D.P. Karanfiliska, M. Bertelli, L. Pojskic, M. Ercan, M. Kellermayer, I.O. Sahin, O.K. Greiner-Tollersrud, B. Tan, D. Martin, R. Marks en M. Dundar. 2024. The impact and future of artificial intelligence in medical genetics and molecular medicine: an ongoing revolution. *Funct Integr Genomics*, 24:138.

<https://doi.org/10.1007/s10142-024-01417-9>.

Patil, M., D.S. Mehta en S. Guvva. 2008. Future impact of nanotechnology on medicine and dentistry. *J Indian Soc Periodontol*, 12(2):34–40. DOI: 10.4103/0972-124X.44088. PMID: 20142942; PMCID: PMC2813556.

Reddy, S. 2024. Generative AI in healthcare: an implementation science informed translational path on application, integration and governance. *Implement Sci.*, 19(1):27. DOI: 10.1186/s13012-024-01357-9. PMID: 38491544; PMCID: PMC10941464.

Schwab, K. 2016. The Fourth Industrial Revolution: What it means, how to respond. Wêreld-Ekonomiese Forum. 16 Januarie 2016. <https://www.weforum.org/stories/2016/01/the-fourth-industrial-revolution-what-it-means-and-how-to-respond>.

Serrano, D.R., F.C. Luciano, B.J. Anaya, B. Ongoren, A. Kara, G. Molina, B.I. Ramirez, S.A. Sánchez-Guirales, J.A. Simon, G. Tomietto, C. Rapti, H.K. Ruiz, S. Rawat, D. Kumar en A. Lalatsa. 2024. Artificial intelligence (AI) applications in drug discovery and drug delivery: Revolutionizing personalized medicine. *Pharmaceutics*, 16(10):1328. DOI: 10.3390/pharmaceutics16101328.

Shen, L. en W. Yang. 2018. Molecular dynamics simulations with quantum mechanics / molecular mechanics and adaptive neural networks. *J Chem Theory Comput*, 14(3):1442–55. DOI: 10.1021/acs.jctc.7b01195. Epub, 26 Februarie 2018. PMID: 29438614; PMCID: PMC6233882.

Eindnotas

¹ Die Wikipediablad omskryf Moore se wet (Moore's Law): https://en.wikipedia.org/wiki/Moore%27s_law.

² Vir 'n bespreking van digitale inklusiwiteit, sien (geen skrywers of deelnemers): Roundtable on digital inclusivity: https://www.un.org/digital-emerging-technologies/sites/www.un.org.techenvoy/files/general/Definition_Digital-Inclusion.pdf.

³ Sien ook: <https://newsroom.intel.com/press-kit/moores-law>.

⁴ Laai af by: <https://www.statssa.gov.za/publications/P0318/P03182023.pdf>.

⁵ Stanford-universiteit bied 'n gratis aanlyn kursus getiteld *AI in healthcare* aan. Bykans 60 000 persone het teen aanvang vanjaar (op 28 Julie) reeds daarvoor ingeskryf. Skakel: <https://www.coursera.org/specializations/ai-healthcare>. Sien ook YouTube- videoskopel: <https://www.youtube.com/watch?v=wD1qn2i3Wb4>.

⁶ Julien Florkin (webtuiste): KI in biomediese wetenskap: Ontdek 6 hoofstukke oor revolusionêre maniere waarop KI biomediese navorsing transformeer. https://julienflorkin.com/wp-content/plugins/gtranslate/url_addon/gtranslate.php?glang=af&gurl=biologie/biomediese/ai-in-biomediese-wetenskap/.

⁷ Meer inligting oor AlphaFold se omvattende proteïenstruktuurdatabasis by: <https://alphafold.ebi.ac.uk>.

⁸ Omvattende inligting by Lewenswetenskappe-elektronmikroskopie-inligtingsentrum: <https://www.thermofisher.com/za/en/home/electron-microscopy/life-sciences/learning-center.html>.

⁹ Insilico medicine (in *Nature*, maar geen verdere verwysings): Insilico: Linking target discovery and generative chemistry AI platforms for a drug discovery breakthrough. <https://www.nature.com/articles/d43747-021-00039-5>.

¹⁰ Hierdie navorsing is geregistreer onder die VSA se National Library of Medicine se ClinicalTrials.gov as: A study of VRG50635 in participants with amyotrophic lateral sclerosis (ALS). ClinicalTrials.gov. ID NCT06215755. Sponsor Verge Genomics. Geen resultate is tot op datum geplaas nie. Verdere inligting ook op die maatskappy se databasis by: <https://www.vergegenomics.com/news-blog/verge-genomics-and-ferrer-announce-agreement-to-co-develop-clinical-stage-als-therapy-vrg50635>.

¹¹ Algemene inligting: Pioneering TechBio solutions in drug discovery: the future of TechBio. <https://www.recursion.com>.

¹² Die biotegnologiemaatskappy absci kondig die eerste doserings aan van pasiënte wat aan inflammatoriese dermsiekte ly met 'n eksperimentele nuwe middel: We're unlocking novel biology and creating better biologics with AI. <https://www.absci.com>.

¹³ Vir verdere inligting hieroor, sien: What are Naïve Bayes classifiers? <https://www.ibm.com/think/topics/naive-bayes>.