

# DIGITALNI DVOJČKI V ERGONOMSKIH UREDITVAH DELOVNIH MEST

ZVONE BALANTIČ<sup>1</sup>, BRANKA BALANTIČ<sup>2</sup> &  
BRANKA JARC KOVAČIČ<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Univerza v Mariboru, Fakulteta za organizacijske vede, Kranj, Slovenija, e-pošta: zvone.balantic@um.si, branka.jarc@guest.um.si.

<sup>2</sup> Šolski center Kranj, Višja strokovna šola, Kranj, Slovenija, e-pošta: branka.balantic@sckr.si.

**Povzetek** Pristop k oblikovanju montažnih linij in delovnih mest v sodobnem svetu Industrije 4.0 je še vedno preveč stihijski. Če hočemo ustvariti delovno mesto, ki je prijazno uporabniku, je potrebno vključiti nešteto spremenljivk z vsemi ergonomskimi načeli. V proces progresivnega in holističnega oblikovanja delovnih mest se je potrebno vključiti že v fazi zasnove izdelka in procesa izdelave ter oblikovanja delovnega mesta. Neustrezno načrtovanje delovnih mest lahko povzroči zastoje v inženiringu delovnega procesa. Če pri načrtovanju proizvoda želimo biti bolj učinkoviti, potem moramo uporabiti dobre izkušnje uporabe digitalnih dvojčkov. Izkušnje teh in podobnih načrtovanj lahko uporabimo za predhodno oblikovanje virtualnega delovnega mesta, na katerem lahko simuliramo obremenitev zaposlenih, identificiramo preobremenitve in jih že v fazi koncipiranja tudi odpravimo. Na ta način dosežemo velik korak v smeri racionalizacije delovnih mest. Pri tem se izognemo ergonomskim spodrsrlajem, ki jih kasneje težko popravljamo. V pomoč so nam sodobna orodja, kot so Tecnomatix JACK, ViveLab Ergo, NAWO ergo simulation, ..., s katerimi lahko simuliramo, generiramo, optimiramo, racionaliziramo in implementiramo virtualno rešitev v robne okvire realne rešitve.

#### Ključne besede:

ergonomija,  
digitalni  
dvojčki,  
delovna  
mesta.

# DIGITAL TWINS IN ERGONOMIC WORKPLACES ARRANGEMENTS

ZVONE BALANTIČ<sup>1</sup>, BRANKA BALANTIČ<sup>2</sup> &  
BRANKA JARC KOVAČIČ<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Univerza v Mariboru, Fakulteta za organizacijske vede, Kranj, Slovenija, e-pošta:  
zvone.balantic@um.si, branka.jarc@guest.um.si.

<sup>2</sup> Šolski center Kranj, Višja strokovna šola, Kranj, Slovenija, e-pošta:  
branka.balantic@sckr.si.

**Abstract** The approach to designing assembly lines and jobs in the modern world of Industry 4.0 is still too spontaneous. If we want to create a user-friendly workplace, it is necessary to include a myriad of variables with all the ergonomic principles. It is necessary to get involved in the process of progressive and holistic job design already in the phase of product design and the process of production and job design. Inadequate job planning can cause downtime in workflow engineering. If we want to be more efficient in product design, then we need to use the good experience of using digital twins. The experience of these and similar planning can be used for the preliminary design of a virtual workplace, where we can simulate the workload of employees, identify overloads and eliminate them already in the design phase. In this way, we are taking a big step towards streamlining jobs. In doing so, we avoid ergonomic slips, which are difficult to repair later. We are helped by modern tools, such as Tecnomatix JACK, ViveLab Ergo, NAWO ergo simulation, ..., with which we can generate, optimize, rationalize and implement a virtual solution in the marginal framework of a real solution.

**Keywords:**  
ergonomics,  
digital  
twins,  
working  
places.

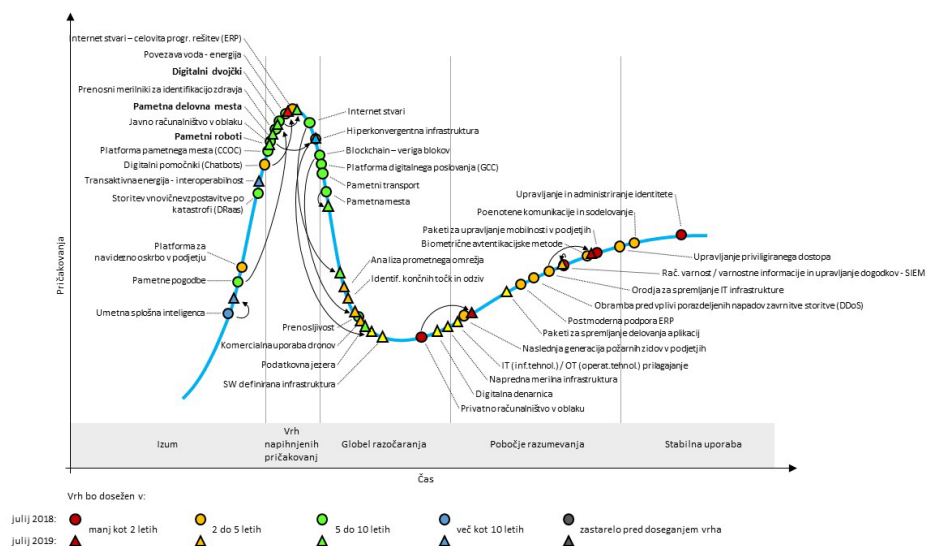
## 1 Uvod

Zgodovinski začetek obdobja digitalnih dvojčkov – DD (angl. Digital Twin - DTwin) pripisujemo kultnemu klicu na pomoč "Houston, we've had a problem", ki ga je tretji dan misije iz lunine orbite na 330.000 km oddaljeno zemljo poslal astronaut Apollo 13, John L. Swigert. Leta 1970 je namreč na vesoljski ladji Apollo 13 prišlo do eksplozije rezervoarja z utekočinjenim kisikom, pri čemer je začel kisik uhajati. K sreči so v vesoljski bazi na zemlji imeli kopijo Apollo 13, na katerem so nemudoma stekla proučevanja in simulacije čiščenja kisika. Na podlagi "dvojčka" Apollo 13 so znanstveniki na zemlji našli rešitev za nastalo situacijo in astronautom posredovali realna navodila za varen povratek domov (NASA, 2020).

Izraz DTwin je bil prvič uporabljen v knjigi *Mirror Worlds* Davida Gelernterja (Gelerter, D. H., 1991), koncept DTwin v proizvodnji pa je prvič uporabil Michael Grieves s Florida Institute of Technology, ki je digitalnega dvojčka predlagal kot konceptualni model upravljanja življenjskega cikla izdelka (PLM) (Grieves, M., 2019). Koncept digitalnih dvojčkov je sestavljen iz treh ločenih delov: fizičnega izdelka, digitalnega / navideznega izdelka in povezav med obema izdelkoma. Povezave med fizičnim izdelkom in digitalnim / navideznim izdelkom so podatki, ki prehajajo iz fizičnega izdelka v digitalni / navidezni izdelek in informacije, ki so na voljo iz digitalnega / navideznega izdelka v fizično okolje (Piascik, R., et al., 2010).

Verjetno imamo vsi izkušnje z oblikovanjem nečesa novega in neraziskanega. Pri utrjevanju neznanih poti prav gotovo razmišljamo induktivno na podlagi naših predhodno pridobljenih znanj in izkušenj ter tako prehajamo iz delnega k celoti. Na ta način simuliramo zamisel s časovnim zamikom, ki jo moramo še preizkusiti v praksi, kar še ni simulacija digitalnega dvojčka, saj ne deluje sinhrono v realnem času. Seveda nas vsak trenutek vabi izziv simulacije realnega dogodka v digitalnem okolju istega časovnega okvira. Sodobni dodelani digitalni modeli pa nam omogočajo pridobivanje in izjemno hitro obdelovanje trenutno zabeleženih fizikalnih podatkov. Analiza teh podatkov omogoča tekoče spreminjanje in prilagajanje odločitvenih postopkov tudi na bazi deduktivne logistike znanih postopkov in njihovih izidov. Vključevanje in rast umetne inteligence (angl. Artificial Intelligence – AI) z vsakim novim trenutkom izboljšuje in krepi povezanost digitalnih dvojčkov v realnem svetu sodobnih sistemov.

Gartner, Inc., ki je vodilno svetovno raziskovalno in svetovalno podjetje in je član S&P 500 (cca. 80% razpoložljive svetovne tržne kapitalizacije), opredeljuje 6 tehnologij, ki bodo v naslednjih letih dosegle splošno uveljavitev. Med temi tehnologijami najdemo tudi DTwin/DD, ki je obdržal in še celo okrepil svoj položaj na Gartnerjevi krivulji pričakovanj iz leta 2018 in 2019 (Gartner, 2018; Gartner, 2019). V prispevku povezujemo DD in ergonomsko ureditev delovnega mesta (DM), zato nas vsekakor zanima, kam Gartner uvršča tehnologijo, povezano s tem vprašanjem. Če zlijemo Gartnerjeva pričakovanja iz leta 2018 in 2019, potem ugotovimo, da se na samem vrhu pričakovanj poleg digitalnih dvojčkov nahajajo tudi pametna delovna mesta in nenazadnje tudi pametni roboti (slika 1). Gartner podobne ugotovitve pripravlja tudi v poročilu za leto 2020.



**Slika 1: Splošna uveljavitev tehnologij v naslednjih 5 do 10 letih (prirejeno po Gartnerju iz leta 2018 in 2019)**

Vemo, da so montažne linije najbolj zapleteni delujoči sistemi, odvisni od nesčetnih faktorjev in medsebojno povezanih spremenljivk. Take sisteme vodijo neposredni vodje, ki s svojimi izkušnjami in znanji obdelujejo podatke in posegajo po stihijem načrtovanju s preprostim ciljem, ki vodi do pozitivne ekonomike podjetja. Če je odločanje prepuščeno eni sami osebi, moramo dopustiti možnost, da ta oseba ne pozna vseh modelov rešitve in zato v danem trenutku ne sprejme optimalne

odločitve. V takih trenutkih si želimo ocene s pomočjo sistemov za podporo odločanju, ki jih imenujemo digitalni dvojčki (DD).

Priporočljivo je omogočanje študije virtualnega delovnega okolja z vsemi dinamičnimi odzivi, ki jih povzroči sprememba vhodnih parametrov na delovnem mestu. Na ta način lahko simuliramo zelo specifične zahteve, ki izhajajo iz različnosti zaposlenih, kot je antropometrija človeka, rasa, spol, starost, stopnja stresa, pojav utrujenosti, bolezen, itd.

Najbolj izpostavljena so področja, kjer dani trenutek ni na razpolago dovolj znanja in resursov, kar se pogosto pokaže pri načrtovalcih (tehnologi, konstruktorji, organizatorji, logistiki, ...), ki včasih premalo poznajo ergonomijo ali ji ne posvečajo dovolj pozornosti. Razveseljivo je, da se v organizacijah vse bolj zavedajo, da mora ergonomija postati del inicialnih zahtev oblikovanja delovnih mest, kjer je potrebno proaktivno prepoznavanje ergonomskega tveganja že v fazi načrtovanja. Priložnost upoštevanja vseh ergonomskih načel se skriva v uporabi DD, kar nam že danes omogoča sodobna računalniška podpora s simulacijami del na proučevanih delovnih mestih.

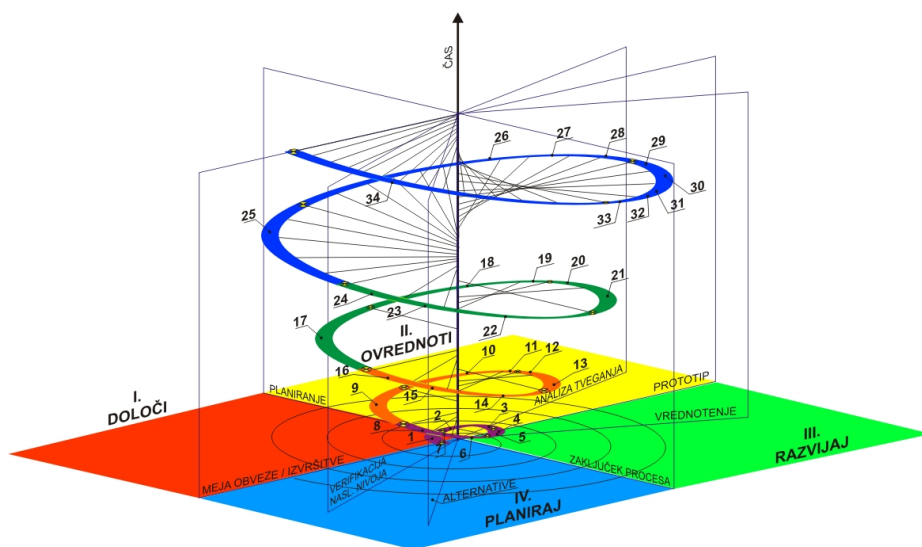
## 2 Materiali in metode

Gartnerjeva izhodišča glede DD razkrivajo velika pričakovanja v kratkem času, saj pričakujejo, da naj bi bil vrh dosežen v času od leta 2024 do 2029 (slika 1). V svetu zasledimo kar nekaj modelov, ki sledijo omenjenim izhodiščem. Tudi sami smo sodelovali pri transformaciji modela slapa v t.i. spiralni model (slika 2) (Balantič, Z., 2006), ki v marsikaterem delu utemeljuje predlog razvoja procesa digitalne produkcije (slika 3) (Caputo, F., Greco, A, Fera, M., Macchiaroli, R., 2019).

Prvi modeli razvoja so bili linearni sekvenčni modeli, ki so temeljili na tradicionalni paradigmi inženiringa. Tak model se je imenoval 'klasični življenjski krog' ali 'model slapa'. Model določa sistematično in zaporedno izvajanje faz analize, specifikacije zahtev, oblikovanja, izvedbe, testiranja in integracije do delovanja in vzdrževanja. Zaradi sekvenčne narave se pri linearnih modelih pojavljajo problemi zato so bolj primerni t.i. spiralni modeli, ki združujejo ponavljalno naravo prototipa s kontrolo in sistemskim pogledom linearnega sekvenčnega modela. Prvotni modeli so bili sestavljeni iz štirih polj: določi (pregle), ovrednoti (analiziraj tveganje in izdelaj

prototip), razvijaj (projektiraj) in planiraj (vrednoti potrošnikovo mnenje in planiraj naslednjo fazo) (Balantič, Z., 2006).

V literaturi zasledimo mnogo poizkusov povezave tehnologije z ergonomijo ob upoštevanju človeških zmogljivosti in posebnosti. Enega najbolj svežih in kompleksnih metodoloških proučevanj lahko zasledimo v Fiat Chrysler Automobiles (FCA), ki močno spodbuja ta pristop in aplikacija panoge je v celoti skladna z novim okvirom, opisanim v tem prispevku in predstavljenim na sliki (slika 3).



Slika 2: 3D pogled na spiralni model (Balantič, Z., 2006)

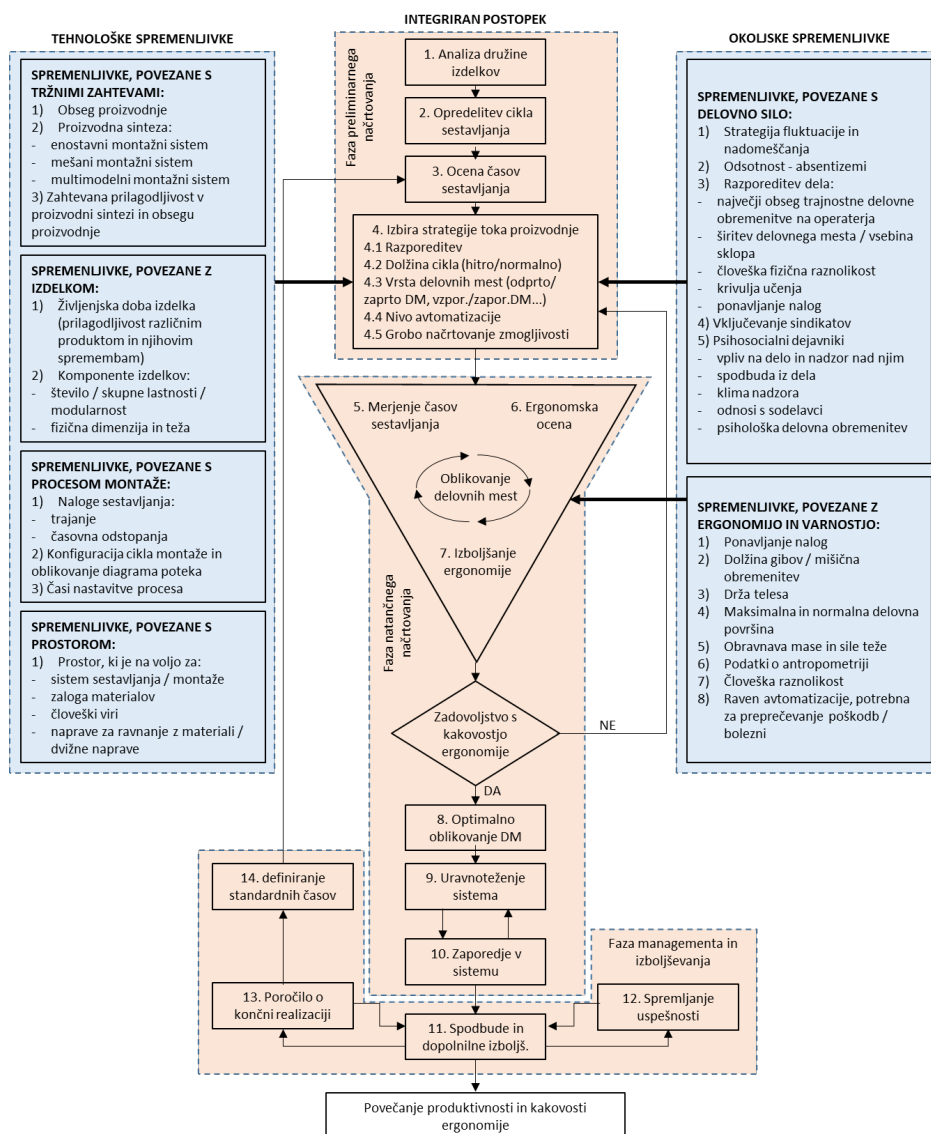
FCA večkrat uporablja virtualno obliko v digitalnem dvojčnem okolju, kjer samo zasnovno potrdi digitalni dvojček, nato pa v procesu ustvarijo hiter prototip montažnih postaj, kar znatno zmanjša napake. Slika 3 prikazuje konceptualni okvir, razvit za oceno načrtovanja in optimizacije sistema montaže, ki povezuje produktivnost z vidiki ergonomije. Model prikazuje vse glavne spremenljivke in odločitve, vključene v integrirani postopek. Postopek je sestavljen iz treh različnih delov - tehnoloških spremenljivk, okoljskih spremenljivk in integriranega postopka. Tehnološke spremenljivke sestavljajo spremenljivke, povezane s tržnimi zahtevami, značilnostmi izdelka, montažo in razpoložljivim prostorom za proizvodnjo izdelka.

Okoljske spremenljivke sestavljajo vse spremenljivke, povezane z delovno silo in njeno fiziološko in psihološko varnostjo ter dobrim počutjem, upoštevajoč tudi psihosocialne dejavnike.

Diagram poteka (slika 3) prikazuje integrirani postopek, razčlenjen v 14 korakov, ki so zajeti v tri faze:

- faza preliminarnega načrtovanja,
- faza natančnega načrtovanja in
- faza managementa in izboljševanja

Metodološki okvir za potrjevanje zasnove oblikovanja delovnega mesta na podlagi ergonomskih analiz je možno prilagajati specifičnim potrebam organizacije, zato ni presenetljivo, če izvorni model najdemo v mnogih izpeljankah.



Slika 3: Metodološki okvir za potrjevanje zasnove oblikovanja delovnega mesta na podlagi ergonomskih analiz - prirjeno po (Battini, D., Faccio, M., Persona, A., Sgarbossa, F., 2011).



Ergonomija vstopa v fazo natančnega načrtovanja (od 5. do 10. koraka), kjer začnemo z merjenjem časov sestavljanja in vrednotenjem skozi ergonomsko oceno (OWAS, RULA, REBA, OCRA, SI indeks ...) in uvedemo izboljšave, ki vodijo do optimalno oblikovanega delovnega mesta. Ob zaključku te faze nam preostane še uravnoteženje sistema.

V praksi najdemo celo vrsto vrhunskih orodij za modeliranje in simulacijo virtualnega dela v virtualnih okoljih. Modeli omogočajo osupljivo prilagoditev človekovih značilnosti realnim okoljem v katerih dejansko potekajo obremenitve zaradi dela. Pri tem lahko simuliramo obremenilna tveganja in preverimo oceno tveganja, odkrivamo nevarnosti pri delu, preverimo udobje na delovnem mestu (DM), dosege telesnih segmentov/okončin, preglednost, utrujenost, meje zmogljivosti itd.

Uporaba takih orodij lahko prihrani čas in zmanjša stroške ergonomskih analiz. Najbolj znana orodja so Siemens Technomatix Jack, NAWO ergo simulation (Raschke, U., Cort, C., 2019). V zadnjih treh letih pa se na trgu pojavlja tudi orodje ViveLab Ergo.

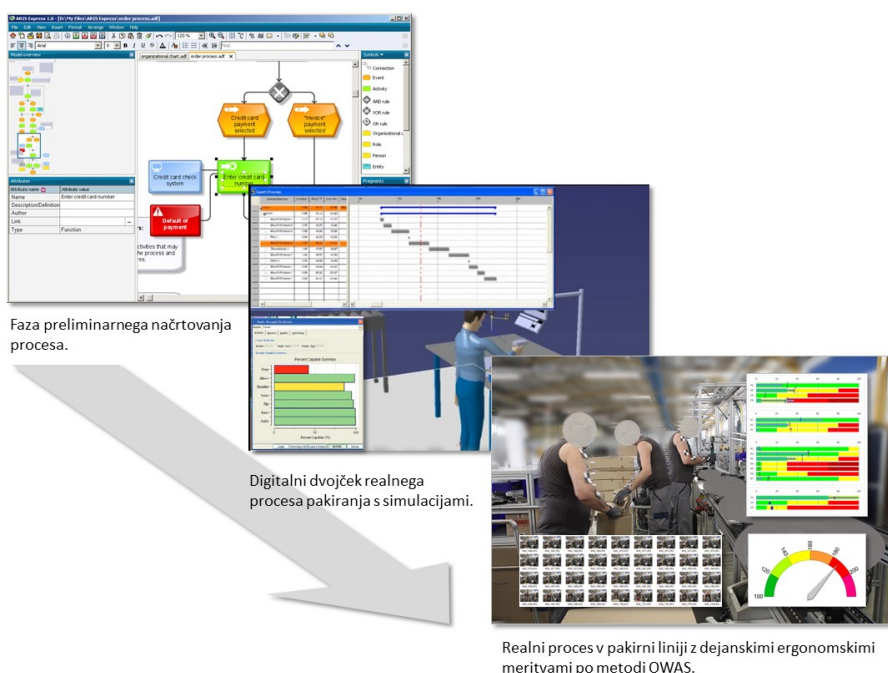
### **3 Rezultati**

Delovna okolja so različna, zato je pri ergonomski analizi potrebno poiskati najbolj ustrezno metodo. Največji izziv nam predstavlja delo nad nivojem srca in glave, montaže in demontaže, varjenje v zaprtih prostorih, manipulacija na težko dostopnih mestih, vzdrževalna dela, logistika ... Posledica ergonomsko neurejenih DM se kaže v utrujenosti, ki preide v nelagodje, kasneje v bolečino in na koncu v mišično-skeletno motnjo in kronično bolezen.

Za preprečevanje negativnih scenarijev je potrebno delo na delovnih mestih proučiti in pravočasno ustrezno ukrepati. Preobremenitev telesnega segmenta moramo identificirati, pri čemer uporabimo eno ali več uveljavljenih metod. Pri obstoječih DM gre za identifikacijo in opredeljevanje preobremenitev, pri načrtovanih DM pa moramo morebitne preobremenitve šele predvideti.

V skladu z ugotovitvami je v ergonomsko načrtovanje smiselno vključiti sistem digitalnih dvojčkov, s katerimi lahko predvidimo delovno okolje in načrtujemo ter simuliramo delovne obremenitve za zaposlene z različnimi antropometričnimi lastnostmi in individualnimi sposobnostmi. Na podlagi analize simulacij lahko preobremenitve odpravimo že v fazi koncipiranja DM. Na ta način dosežemo velik korak v smeri racionalizacije delovnih mest.

V pomoč so nam sodobna orodja, kot so JACK, NAWO ergo simulation, Technomatix, ViveLab Ergo..., s katerimi lahko simuliramo, generiramo, optimiramo, racionaliziramo in implementiramo virtualno rešitev v robne okvire realne rešitve.



**Slika 4: Digitalna transformacija s pomočjo digitalnega dvojčka in poudarkom na ergonomski simulaciji v slovenskem podjetju.**

S pristopom, ki je prikazan na sliki 4 lahko proučimo praktično neomejeno prostostnih stopenj zamišljenega modela. Pri enostavnih in usmerjenih proučevanjih je omenjeni model prezahteven, se pa izkaže za izjemno uporabnega pri načinu

hitrega zajema podatkov. Ozko grlo takih modelov je zajem podatkov, ki pri klasični metodi običajno poteka na optični način z vizualizacijo, pri novejših modelih pa uporabimo prostorski zajem podatkov – položajev sklepov, s pomočjo na telesu nameščenih senzorjev. Pridobljeni podatki so osnova za simulacijo, kjer imamo podobna fizikalna izhodišča pogojena z delovnim mestom, vendar različne lastnosti zaposlenih (velikost telesa, spol, starost, zdravstveno stanje ...). V takem primeru lahko simulacijo spremenimo v trenutku in proučimo novo nastale odzive, ki se bodo pokazali v realnih delovnih okoljih. Seveda je v aktualnem času na voljo že nešteto različnih aplikativnih rešitev, od spremljanja zasedenosti parkirnih mest v parkirnih hišah, simulacija pretočnosti semaforiziranih sklopov, simulacija največjih tveganj za zdravje v proizvodnji izdelkov, simulacija razvoja določene bolezni ob pojavu simptomov (izkušnje Covid-19) itd.

#### **4 Razprava**

Pri oblikovanju DD posežemo po podatkih iz realnega okolja, ki jih modeli potrebujejo za približevanje dejanskim stanjem (podatki o delavcih, opremi, postavitvi, procesu, metodah, kakovosti, starosti, varnosti ...). DD, ki bo obdeloval podatke, mora vsebovati protokole oz. modele, ki običajno uporabijo standardizirane ergonomske metode (OWAS, RULA, REBA). Sodobni modeli temeljijo na senzoriki, umetni inteligenci, fiziki, medicini in inženiringu. DD lahko vsebuje vmesnik s pomočjo katerega lahko pri simulaciji zajemamo dinamične podatke iz realnega okolja in jih vključujemo v simulacijo.

V ergonomskih modelih je raven abstrakcije uporabniku zelo prijazna. Simulacije so običajno zelo razumljive in prilagojene razumevanju brez dodatnih konverzij pretakajočih se informacij in signalov. Večina modelov je zgrajena modularno z namenom, da jih lahko dograjujemo v večje in bolj kompleksne hierarhične modele (komponenta DD, sestav, proizvodna linija), združenja (povezave med DD) in Peer-to-peer sisteme (združenja DD, ki opravljajo enake ali podobne funkcije).

Pri uporabi DD v ergonomskem načrtovanju se moramo soočiti z določenimi omejitvami. Ta trenutek je na voljo kar nekaj SW orodij, ki so še vedno zelo draga. V ergonomiji poznamo ogromno ocenjevalnih metod, ki pa niso standardizirane v klasičnem smislu, zato prav to predstavlja določeno zagato pri razvijalcih SW orodij. Metode so sicer uveljavljene, vendar so skoraj vse še vedno v fazi izkustvenih

prilagajanj in razvoja. Modeli, kot so Siemensov SW imenovan "Tecnomatix Jack" (Tx Jack) ponuja simulacijo obremenitev telesnih segmentov pri določenem delu. Obremenitve so nato povezane z najbolj razširjenimi sistemi ocenjevanja kot je npr. OWAS metoda. Prav ta in podobne metode, so stičišče morebitnih primerjav med "ročnim" in avtomatskim ocenjevanjem delovnih mest. Za izvedbo obeh načinov je potrebno znanje, ki je nepogrešljivo predvsem pri presoji učinkov obremenitev na telo proučevanega delavca. Ključne prednosti uporabe omenjenih simulacij v sistemu DD se pokažejo v velikem naboru ergonomskih ocenjevanj, ki izhajajo iz istega izvora – zajema podatkov. Pri uporabi Tx Jack lahko z izborom proučimo vsaj 9 različnih ergonomskih metod (angl.: Low Back Spinal Force Analysis, Static Strength Prediction, NIOSH Lifting Analysis, Metabolic Energy Expenditure, FatigueRecovery Analysis, Ovako Working Posture Analysis (OWAS), Rapid Upper Limb Assessment (RULA), Manual Handling Limits in Predetermined Time Analysis) (Pekarcikova, M., Ižarikova, G., Trebuna, P., 2019), kar pa pri ročnem načinu seveda ni mogoče storiti v kratkem času.

## 5 Zaključek

Aktivna povezanost DD v ergonomskih ureditvah DM ima vsekakor ogromno potencialno moč, kar implicitno napoveduje tudi družba Gartner, ki v samih digitalnih dvojčkih in v pametnih delovnih mestih vidi velika pričakovanja v naslednjem 5 do 10 letnem obdobju. Če k tem pričakovanjem dodamo še podobna razmišljanja o pametnih robotih, ki sodelujejo s človekom (kolaborativni roboti), potem dokaj jasno vidimo obrise prihodnosti na omenjenem področju. Čez nekaj let si bomo s pomočjo SW zamislili delovno mesto in vanj vnesli vstopne attribute, ki izhajajo iz človeka. Programsko orodje bo proučilo delavčeve obremenitve in v primeru preobremenitev vključilo souporabo kolaborativnega robota, ki se bo prilagodil človeškemu sodelavcu.

## Literatura

- Balantič, Z. (2006). Multimedia Spiral Architecture Development for Effective Medical Education. WSEAS Transactions on Computers, Athens & New Jersey,, (str. 10(5), 2293-2301.).
- Battini,D., Faccio, M., Persona, A., Sgarbossa, F. (2011). New methodological framework to improve productivity and ergonomics in assembly system design. International Journal of Industrial Ergonomics 41, 30-42.
- Caputo, F., Greco, A, Fera, M., Macchiaroli, R. (2019). Digital twins to enhance the integration of ergonomics in the workplace. International Journal of Industrial Ergonomics 71, 20-31.
- Gartner. (13. dec. 2018). Newsroom - Press Releases. Pridobljeno iz Gartner 2018 Hype Cycle for IT in GCC Identifies Six Technologies That Will Reach Mainstream Adoption in Five to 10 Years : <https://www.gartner.com/en/newsroom/press-releases/2018-12-13-gartner-2018-hype-cycle-for-it-in-gcc-identifies-six-technologies-that-will-reach-mainstream-adoption-in-five-to-10-years>
- Gartner. (14. 10 2019). Newsroom. Pridobljeno iz Gartner's 2019 Hype Cycle for IT in GCC Indicates Public Cloud Computing Will Transform Businesses: <https://www.gartner.com/en/newsroom/press-releases/2019-10-14-gartner-s-2019-hype-cycle-for-it-in-gcc-indicates-pub>
- Gelenter, D. H. (1991). Mirror Worlds: or the Day Software Puts the Universe in a Shoebox—How It Will Happen and What It Will Mean. Oxford; New York: Oxford University .
- Grieves, M. (2019). Virtually Intelligent Product Systems: Digital and Physical Twins, in Complex Systems Engineering. Theory and Practice, 175-200.
- NASA. (13. april 2020). NASA HIstory. Pridobljeno iz 50 Years Ago: “Houston, We’ve Had a Problem” : <https://www.nasa.gov/feature/50-years-ago-houston-we-ve-had-a-problem>
- Pekarcikova, M., Ižarikova, G., Trebuna, P. (2019). The Application of Software Tecnomatix Jack for Design the Ergonomics Solutions. V Intelligent Systems in Production Engineering and Maintenance (str. 325-336). Wrocław University of Science and Technology.
- Piascik, R., et al. (2010). Technology Area 12. Materials, Structures, Mechanical Systems, and Manufacturing Road Map.
- Raschke, U., Cort, C. (2019). Siemens jack. DHM and Posturography.

