

# VIZIJA DINAMIČNE VPETOSTI ERGONOMIJE V MANAGEMENT I4.0

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

<sup>1</sup> Univerza v Mariboru, Fakulteta za organizacijske vede, Kranj, Slovenija  
zvone.balantic@um.si

<sup>2</sup> ŠC Kranj, VSS, Kranj, Slovenija  
branka.jarc@guest.um.si

**Sinopsis** Ergonomija je znanost, ki človeka povezuje z njegovim delom, pri tem pa proučuje anatomsko, fiziološko, mehansko, kognitivno in organizacijska načela vplivov na zmogljivost človeka pri delu. Opredeljuje tudi proces interdisciplinarnega proučevanja delovnih obremenitev ter iskanje razbremenitev, kadar obremenitev povzroča neudobje ali celo prekoračuje tolerančne okvire ergonomskih faktorjev. Z integracijo Industrije 4.0 v poslovne in produkcijske sisteme postaja klasična množična proizvodnja del zgodovine. Človek in ergonomija se prepletata s strategijo vitke proizvodnje, ki ima velik vpliv na stalno izboljševanje procesov, na celovito kakovost in na organiziranje delovnih ciklov. Tudi v strategiji vitke proizvodnje je človek ključni vitalni člen stremjenja k popolnosti in optimalnosti. V proces izboljševanja ekstremnih delovnih pogojev, ki jim je človek izpostavljen, vključujemo avtomatizacijo. Posebno je to pomembno pri apliciranju I4.0, saj stalna in neprekinjena izmenjava podatkov med ključnimi točkami procesa, obdelovanci, orodji, stroji, roboti in človekom v nove okvire postavlja tudi ergonomijo.

**Ključne besede:**

management,  
ergonomija,  
industrija 4.0,  
inženiring,  
digitalni dvojčki

# VISION OF DYNAMIC INTEGRATION OF ERGONOMICS IN I4.0 MANAGEMENT

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

<sup>1</sup> University of Maribor, Faculty of Organizational Sciences, Kranj, Slovenia  
zvone.balantic@um.si

<sup>2</sup> ŠC Kranj, VSS, Kranj, Slovenija  
branka.jarc@guest.um.si

**Abstract** Ergonomics is a science that connects man with his work, while studying the anatomical, physiological, mechanical, cognitive and organizational principles of influences on human performance at work. It also defines the process of interdisciplinary study of workloads and the search for reliefs when the load causes discomfort or even exceeds the tolerance limits of ergonomic factors. With the integration of Industry 4.0 into business and production systems, classic mass production is becoming part of history. Man and ergonomics are intertwined with a strategy of lean production, which has a great impact on the continuous improvement of processes, on overall quality and on the organization of work cycles. Even in the strategy of lean production, man is that vital link in the pursuit of perfection and optimality. We include automation in the process of improving the extreme working conditions to which humans are exposed. This is especially important when applying I4.0, as the constant and uninterrupted exchange of data between key process points, workpieces, tools, machines, robots and humans also places ergonomics in new frameworks.

**Keywords:**  
management,  
ergonomics,  
industry 4.0,  
engineering,  
digital twins

## **1 Uvod**

Kdo je človek? Tako preprosto vprašanje. Tudi odgovor bi moral biti preprost, saj človeka vendarle poznamo. Človek je vendar hodeče inteligentno bitje, ki komunicira in gestikulira, ustvarja civilizacijo in je bitje, ki premore največjo stopnjo zvokovnega sporazumevanja ... Človek zna razvijati ideje, zna upati in zna ljubiti. Ob tem zna tudi sovražiti in čutiti bolečino. Človek je postal zelo povezano družbeno bitje, ki živi v skupnosti in ustvarja v delovnih okoljih. Naštevati bi lahko do onemoglosti in bolj kot bi se oddaljevali od osnovne človeške strukture, bolj bi se zapletali v protislovja, celo bolj kot kjerkoli drugje. Človek se je razvijal v času in se prilagajal aktualnim spoznanjem, med katerimi se je vse bolj porajalo vprašanje produktivnosti, racionalizacije in humanizacije. Človek potuje vse hitreje v času in zaradi te hitrosti svet postaja majhen prostor, na katerem se gnete velika množica ljudi – vsak s svojo zgodbo, informacijo, odnosom do življenja, do soljudi in tudi do dela. Človek je največje čudo tega sveta, ki je vpeto v nešteto naravnih procesov v različnih okoljih. Za svoje življenje človek potrebuje svetlobo, zrak, vodo, hrano in ustrezno bivalno in delovno okolje. Energijo črpa iz osnovnih življenjskih elementov in jo želi pretočiti v smisel svojega življenja, ki ga išče tudi v delu in to v vseh življenjskih obdobjih. Ko človek začne uživati v smislu svojega dela in pri tem ne čuti fizikalnih, kognitivnih in organizacijskih utesnjenosti, je verjetno šel po poti, na kateri se je srečal z ergonomijo.

In kako dolgo se človek srečuje z ergonomijo? Dolgo, zelo dolgo, saj je že v pradavnini poskušal prilagoditi prva orodja, ki jih je iznašel in kasneje dodeloval. Arheološke najdbe dokazujejo, da je že pračlovek klesal in oblikoval enostavna orodja po svoji meri, da si je s tem olajšal delo. Vrednost ergonomije je zlahka razumljiva vsakomur, ki je kadar koli poskušal opraviti delo z napačnim orodjem. Ob uporabi neustreznega orodja lahko traja delo dlje ali pa ga sploh ne opravimo. Od tega je odvisna kakovost opravljenega dela in nenazadnje visoko tveganje za nastanek poškodb pri delu. Vse to lahko povzroči nezadovoljstvo in padec motivacije. Slabo načrtovanje delovnih mest lahko privede do neučinkovitosti, izpostavljenosti tveganjem, do povečanja števila nesreč in do odsotnosti z dela.

## 2 Ergonomija

Nekateri arheološki dokazi dokazujejo, da so Grki v 5. stoletju pr. n. št. pri načrtovanju orodij, dela in delovnih mest uporabljali ergonomska načela (Marmaras, Poulakakis, & Papakostopoulos, 1999). Podobno arheološki dokazi kažejo tudi, da so zgodnje egipčanske dinastije med drugim izdelovale orodje in gospodinjstvo opremo v skladu z ergonomskimi načeli (Okorji, 2022). Prvi, ki pa je v moderno okolje znanosti vnesel ime ergonomija, je bil Wojciech Bogumil Jastrzębowski (1799–1882). Znanstvenik, ki se je ukvarjal z raziskovanjem interaktivnih odnosov med človekom in delovnim okoljem, je leta 1857 pojem ergonomija uporabil v svojem članku z naslovom "Rys ergonomji czyli nauki o pracy, opartej na prawdach poczerpniętych z Nauki Przyrody" (Pregled ergonomije, tj. vede o delu na podlagi ugotovitev, ki izhajajo iz naravoslovnih ved) (Jastrzębowski, Koradecka, Baluk-Ulewiczowa, & Golebiowska, 1997).

Področje znanosti, ki jo danes imenujemo ergonomija, pa je uradno ime dobilo poleti leta 1949, ko se je skupina znanstvenikov zbrala v Oxfordu, v Angliji, da bi razpravljala o tematiki delovanja človeka. V omenjeni skupini so se zbrali strokovnjaki s področja anatomije, fiziologije, psihologije, medicine dela, industrijske higijene, projektiranja, študija dela, arhitekture, elektrotehnike, strojništva in vseh, katerih področje se je prepletalo s pojmom človeške zmogljivosti (Murrell, 1965). Na tem srečanju je bil predstavljen predlog, da bi skovali besedo za nastajajoče področje. Dogovorili so se za kombinacijo grških besed ergos (delo) in nomos (naravni zakoni). Skupina se je odločila sprejeti ta izraz in tako je znanstveno področje poimenovala ergonomija.

Znanstvena veja, imenovana ergonomija, izpostavlja držo pri delu in premikanje telesa v delovnem prostoru. Pri tem pogledu smo pozorni na sedenje in stanje ter na dviganje in premikanje bremen. Poleg teh parametrov so značilni še ostali fizikalni parametri, kot so svetloba, hrup, aerosoli, sevanja itd., ki vplivajo na fiziologijo dela in oblikovanje inženirskih in ostalih sistemov. Z ergonomijo je neposredno povezano varovanje in zdravje pri delu pri vseh delovnih pogojih in značilnostih in sposobnostih ljudi v posameznih življenjskih obdobjih.

Če preskočimo množico pomembnih mejnikov v razvoju ergonomije, lahko pojasnimo še sodobno ergonomijo, ki danes povezuje udobje in ugodje, zdravje ter produktivnost, kar pomeni, da prepleta medicinsko, biološko in inženirsko znanost. Med posameznimi znanstvenimi disciplinami se razvija interdisciplinarnost, ki povezuje medicino, biomehaniko, antropologijo, kineziologijo, fiziologijo, psihologijo, sociologijo, ekologijo, ekonomijo, organizacijo dela, teorijo sistemov, mehanski in industrijski inženiring in industrijsko oblikovanje. Skupno vsem naštetim pogledom je obravnavanje fizioloških in kognitivnih (spoznavnih) lastnosti človeka in njegovega delovnega okolja. Pri tem okolje ne pomeni samo delovno okolje, temveč tudi delovne naprave in material, metode človekovega dela in organizacijo le-tega. Ergonomija se ukvarja z vzajemnimi odnosi in povezavami človeka z njegovim delovnim okoljem v vsej njegovi raznovrstnosti, dinamiki in strukturi. V skladu z današnjimi usmeritvami v znanosti, z zmožnostmi in s potrebami v sodobnem svetu je pozornost ergonomije usmerjena v sistem med človekom in okolico (Balantič, Polajnar, & Jevšnik, 2016).

Človek je najpomembnejši del organizacijskih struktur, saj je od njega odvisna pretočnost snovi, energije in informacij, s katerimi upravlja neposredno ali posredno. Gospodarska dejavnost je neposredno odvisna od človeka in njegove učinkovitosti, kjer pa ergonomija odigra zelo pomembno vlogo.

## **2.1 Sodobni pogled na ergonomijo**

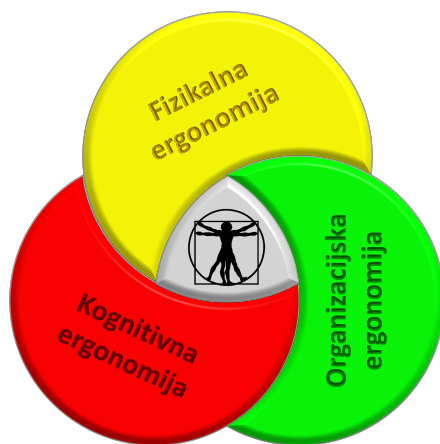
Ergonomija je tesno povezana z ekonomijo, saj pravilni pristopi v ergonomiji omogočijo racionalnejše delo in funkcioniranje družbe kot celote. Sodobne definicije vpletajo tudi trajnostni razvoj, ta pa načeloma predstavlja zadovoljevanje potreb aktualnega prebivalstva, ki ne gre na račun omejevanja potreb prihajajočih rodov (White, 2008). Ergonomsko urejanje delovnih okolij danes nima neposrednega vpliva na prihajajoče rodove, pa vendar se ergonomija ukvarja tudi z bivalnim okoljem, ki ga gradimo danes in v katerem bodo funkcionirale tudi naslednje generacije.

Dobra ergonomska načela krepijo družbeno odgovornost, ki je temelj trajnostnemu razvoju. Ergonomske principe je treba vgrajevati v izdelke in storitve ter v znanje, kar pa je potrebno stalno poglobljati. Nove tehnologije zahtevajo vzporedni razvoj ergonomije in njeno vključevanje na vseh možnih točkah. Ergonomija je za delodajalca sinonim za racionalizacijo in humanizacijo dela. Če pocenimo produkcijo

in pri tem poskrbimo za boljše počutje delavcev, ki so manj obremenjeni, potem smo se uspešno vključili v trajnostni razvoj družbe. Gospodarski in socialni razvoj ter varstvo okolja so trije glavni stebri trajnostnega razvoja in praktično povsod najdemo elemente ergonomije, ki jih vgrajujemo v vse tri stebre. Ergonomija preučuje človekove telesne in duševne zmožnosti, povezane z delom, delovnim okoljem in delovnimi obremenitvami. S preučevanjem prilagodljivosti dela (orodja, delovne naloge, delovni prostor, procesi ...) človeku omogočimo večjo učinkovitost pri opravljanju dela. Z ustreznim oblikovanjem vplivamo na uporabnost in varnost orodij, strojev in naprav ter delovnih in poslovnih sistemov.

Za ergonomijo je značilno, da v literaturi najdemo veliko definicij in še več pojasnil. Univerzalno definicijo lahko oblikujemo matematično logično, saj presek množic skoraj vseh definicij ergonomije predstavljata – optimizacija/racionalizacija in humanizacija dela. Pa vendar so našteje podmnžice lahko le del organizacijskega razumevanja ergonomije.

Sodobno razumevanje ergonomije, kot ga predstavljajo na številnih univerzah po svetu, je sicer dokaj kompleksno, vendar je v osnovi razdeljeno na področje fizikalne, kognitivne in organizacijske ergonomije (slika 1).



**Slika 1: Sodobno razumevanje ergonomije v treh podsklopih – fizikalna ergonomija, kognitivna ergonomija in organizacijska ergonomija**

Vir: lasten.

### 2.1.1 Fizikalna ergonomija

Fizikalna ergonomija (slika 2) se nanaša predvsem na anatomijo in antropometrijo človeka, na fiziološke in biološke lastnosti, povezane s prehrano ter fizično aktivnostjo. Človek vsa ta področja praktično srečuje pri stalno ponavljajočih se gibih pri delu. Človeka utrujajo neustrezni delovni položaji in s tem povezana mišična obolenja ter pojav ortopedskih deviacij. Zaradi neprimernih delovnih mest se lahko pojavijo kostno-mišična obolenja. V človeškem telesu potekajo metabolizem (katabolizem in anabolizem) in pretvorba energije, potrebna za življenje in dinamično delo. Gibajoče telo zahteva primeren gibalni prostor, ki je postavljen v okolje fizikalno merljivih parametrov (svetloba, zvok, koncentracija snovi, mikroklimatski parametri ...) (Balantič, 2012).



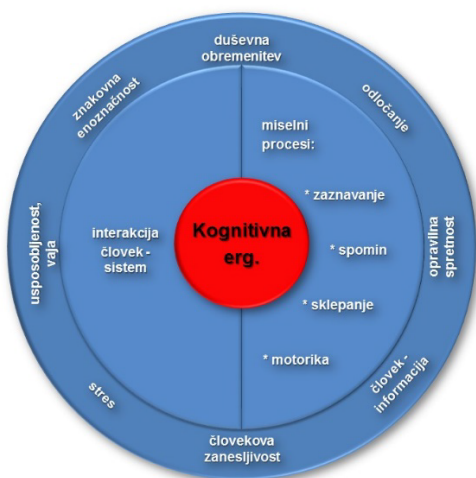
Slika 2: Fizikalna ergonomija

Vir: lasten.

### 2.1.2 Kognitivna ergonomija

Kognitivna ergonomija (slika 3) se ukvarja z miselnimi procesi, kot so zaznavanje, spomin, sklepanje in motorika ter interakcija med človekom in sistemom, v katerega je vključen (poslovni ali delovni sistem).

Človek to tematiko srečuje pri vsakokratnem odločanju in pri opravljeni spretnosti, kjer je ključnega pomena vsaka informacija, ki mora biti seveda ustrezno zajeta, obdelana in posredovana. Človek je načeloma manj zanesljiv kot stroj, vendar pa je človek še vedno ključni element povratnih zvez. Usposobljenost in stalna vaja omogočata vedno bolj zanesljivo in verodostojno povratno informacijo.



Slika 3: Kognitivna ergonomija

Vir: lasten.

Ob neustrezni uravnoveženosti miselnih transferov lahko prihaja do pojava stresa in drugih duševnih obremenitev. Ko omenjamo miselne procese, se že do neke mere povezujemo z organizacijsko ergonomijo. Miselni procesi morajo potekati enoznačno in morajo biti izzvani z ustreznim znakovnim in/ali miselnim sporočilom (Balantič, 2012).

### 2.1.3 Organizacijska ergonomija

Organizacijska ergonomija (slika 4) se ukvarja z optimizacijo, s humanizacijo in z racionalizacijo tehniških in poslovnih sistemov, poznavanjem organizacijskih struktur, politik in postopkov oziroma protokolov.



Ergonomska zasnova organizacije potrebuje zanesljivo komunikacijo v realnem in virtualnem delu organizacije in v duhu timskega dela. Kvantitativno vrednotenje potrebuje zanesljivo analizo delovnega časa. Okolica sistema potrebuje elemente makroergonomije, ki se interaktivno povezujejo z mikroergonomijo (slika 5). Ergonomska kultura v organizaciji se v paradigmi dela (vzorci in metode dela) kaže z dvigom kakovosti. Cilj je uravnotežen delovni sistem, ki se izkaže z zadovoljstvom pri delu in zavezanosti delu.



**Slika 4: Organizacijska ergonomija**

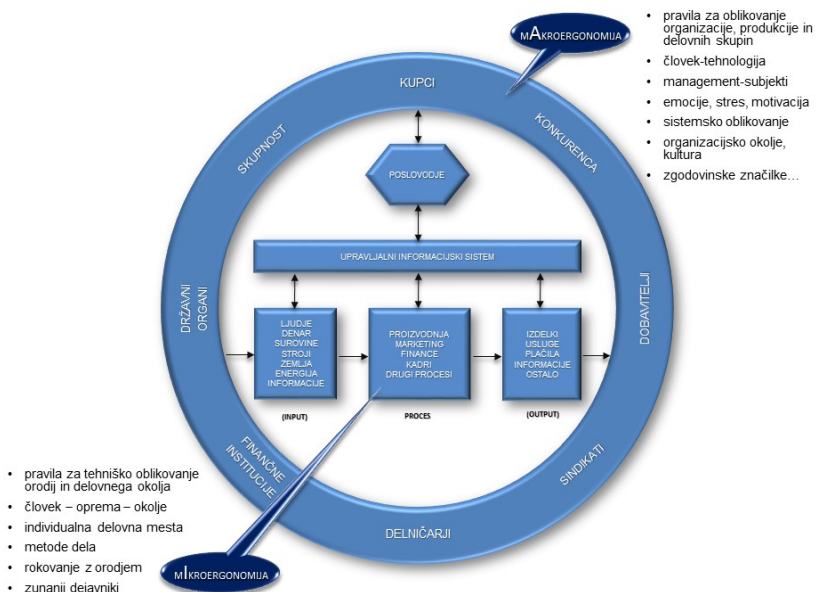
Vir: lasten.

Osnovno ravnotežje zahteva uravnoteženje elementov modela človek, okolje, orodja in tehnologija, organizacija in dejavnosti. Vsaka sprememba v sistemu medsebojno vpliva na elemente sistema. Za podjetje pomeni ergonomski proces konkurenčno prednost z vidika sprememb v organizaciji (Balantič, 2012).

## 2.2 Mikro- in makroergonomija

Človek najbolj občuti pozitivni ali negativni vpliv ergonomskih učinkov, ko ti delujejo v njegovi neposredni okolici oziroma v neposrednem mikro delovnem okolju. Ergonomijo, ki jo povezujemo z neposrednim procesom (proizvodnja, marketing, finance, kadri ...), vplivi na človeka iz okolja ter vplivi človeka na okolje, imenujemo mikroergonomija (Balantič, Polajnar, & Jevšnik, 2016).

Budnick (Budnick, 2001) definira ergonomijo kot proaktivno misel, kjer pravi, da ergonomija odpravlja ovire za kakovost, produktivnost in varno delovanje človeka v sistemu med človekom in strojem s povezavo proizvodov, opreme, orodja, sistemov, nalog, delovnih mest in okolja do ljudi.



Slika 5: Mikro- in makroergonomija v organizaciji

Mikroergonomija proučuje odnos med človekom, opremo in delovnim okoljem, obravnava individualna delovna mesta, metode dela, skrbi za pravilno rokovanje z orodjem in proučuje ter vključuje zunanje faktorje, ki vplivajo na delo. Mikroergonomija skrbi za pravilno tehniško oblikovanje orodij in delovnih okolij (slika 5).

Ergonomija omogoča tudi širši pogled na delovno okolje. V proces vstopajo od širše okolice odvisne spremenljivke, kot so kupci, konkurenca, dobavitelji, sindikati, delničarji, finančne institucije, državni organi, skupnost, v kateri se nahaja organizacija ... Vplivi te okolice se na mikrookolje prenašajo z vodenjem in drugimi vstopnimi in izstopnimi povezavami (Balantič, Polajnar, & Jevšnik, 2016).

Makroergonomija človeka povezuje s tehnologijo in z menedžmentom. Oblikovanje obravnava sistemsko. Odnosi med ljudmi vključujejo problematiko povezav med več delovnimi mesti, zato stres in motivacijo obravnavamo na nivoju makroergonomije. Makroergonomija spoštuje zgodovinske značilke in kulturne različnosti, ki pogojujejo organizacijske diferenciacije tudi pri sistemskem oblikovanju organizacije, produkcije in delovnih skupin.

Ustrezni ergonomski interakciji na mikro- in makronivoju omogočata učinkovito organiziranje delovnih procesov in izboljšujeta ekonomsko učinkovitost. Ker so cilji vsakega poslovnega sistema hitrejši tehnološki razvoj, večja prožnost in odzivnost, inovativnost in sposobnost prilagajanja razmeram na trgu, postaja ergonomija temelj dobre organizacijske klime in večje učinkovitosti človeka.

Ergonomija povezuje produktivnost, učinkovitost, varnost, udobje in ugodje med izvajanjem delovnih dejavnosti. Delovno dejavnost je treba prilagoditi človeku ter njegovim sposobnostim in ne obratno.

### **3 Ergonomska načela**

Ergonomska načela so zelo pomembna za dvig zavedanja o pomenu ergonomije, ki ima neposredni in posredni vpliv na izdelke, storitve in nenazadnje na znanje. Če nam v organizaciji uspe izpostaviti ergonomska načela in oblikovati kulturo varnega dela, potem lahko računamo na dolgoročno stabilno zmanjševanje stroška dela, ki izhaja iz skrbi za varno in zdravo delo. Produktivnost v organizacijah se poveča zaradi zmanjšane števila telesnih poškodb, odsotnosti z dela (absentizma) in zmanjšanja števila napak zaradi nezbranosti ali zmanjšane telesne zmogljivosti zaradi bolnega zaposlenega na delovnem mestu (prezentizma). Oblikovana so štiri načela, ki jih je prvič predstavil McCormick (McCormick, 1970). Ti principi so uporabni za velik del problematike oblikovanj delovnih okolij, kjer se sprašujemo "*Kaj dati kam?*". Gre za razmišljanje o kontrolnih in kazalnih elementih, ki jih nameščamo za spremljanje in upravljanje procesov, kjer nastopi človek kot upravni sistem (kuhinje, stroji, trgovine, delavnice, baze podatkov, bolnice, banke ...) (Pheasant & Haslegrave, 2005). Ta načela so:

- načelo pomembnosti – najpomembnejši elementi morajo biti na najbolj dostopnih mestih;

- načelo frekvence – najbolj pogosto uporabljene stvari morajo biti na najbolj dostopnih mestih;
- načelo funkcije – stvari oziroma predmeti s podobnimi funkcijami morajo biti združeni v sklope;
- načelo sekvence – stvari, ki se običajno uporabljajo in pojavljajo v določenih zaporedjih, je treba umeščati v enakih zaporedjih.



**Slika 6: 12 dejavnikov ergonomskega tveganja**

Pogoj za dobro oblikovanje delovnega okolja je korektno sledenje ergonomskega načelom, toda vedno ne gre vse po načrtih. Ob tem se moramo zavedati določenih tveganj in se jim pravočasno izogniti.

Ocena tveganja je utečen izraz, ki v prvi fazi prepoznava nevarnost in identificira ogrožene osebe. V naslednji fazi ocenimo moč dejavnika tveganja in ta tveganja razvrstimo. V tretji fazi določimo protokol preventivnega ukrepanja, kateremu sledi dejansko ukrepanje. V zadnji, tj. peti fazi, pride na vrsto spremljanje izvajanja ukrepov in morebitno posodabljanje ukrepov.

Tudi na področju ergonomije poznamo morebitna neskladja s priporočili, ki lahko zelo hitro postanejo dejavniki tveganja v ergonomiji (slika 6), kjer lahko izpostavimo predvsem dolgotrajno sedenje in dolgotrajno stanje, nepravilno rokovanje z bremenimi, napačna gibanja v področju dinamične in statične antropometrije, težave z vidom, s sluhom, toploto ...

Konkretizacija ergonomskih načel je v vsaki organizaciji praktično neomejena.

#### 4 Kibernetiski sistem človek – stroj

Z receptorji človek od stroja oziroma delovnega okolja sprejema podatke o karakteristikah procesa. V tej povratni zanki sodelujejo kazalni oziroma kontrolni elementi. Pri tem je izredno pomembno ergonomsko oblikovanje in razporejanje teh elementov. Ustrezna postavitve omogoča celovitejši nadzor procesa, od koder prihajata vidna in zvočna informacija. Skoraj 80 % informacij človek sprejema skozi oko, tj. čutilo vida, v obliki svetlobnih signalov. Človek v obliki zvoka skozi uho sprejme približno 13 % celotnih informacij. Preostale informacije se običajno porazdeli na otip, vonj in okus (Balantič, 2012).

Človek in delo sta že vseskozi nerazdružljiva člena v kibernetiskem sistemu, imenovanem regulacijski krog. V tej sistemski zanki človek nastopa kot upravni sistem (US), delo oziroma delovno okolje pa kot objekt upravljanja (OU). Od US pa do OU potuje informacija po osnovni zvezi (OZ) in se vrača po povratni zvezi (PZ). V sodobni praksi si želimo, da bi delo potekalo povezano in brez prekinitev, zato je treba poskrbeti za zaključen regulacijski krog (slika 7), ki je razpet med US in OU. Marsikdaj se dogaja ravno obratno, ko vlogo US prevzame delovno okolje, ki vpliva na OU oziroma človeka. Seveda taka situacija ergonomsko ni sprejemljiva (Balantič, 2012).



Slika 7: Temeljni kibernetiski sistem med človekom in strojem

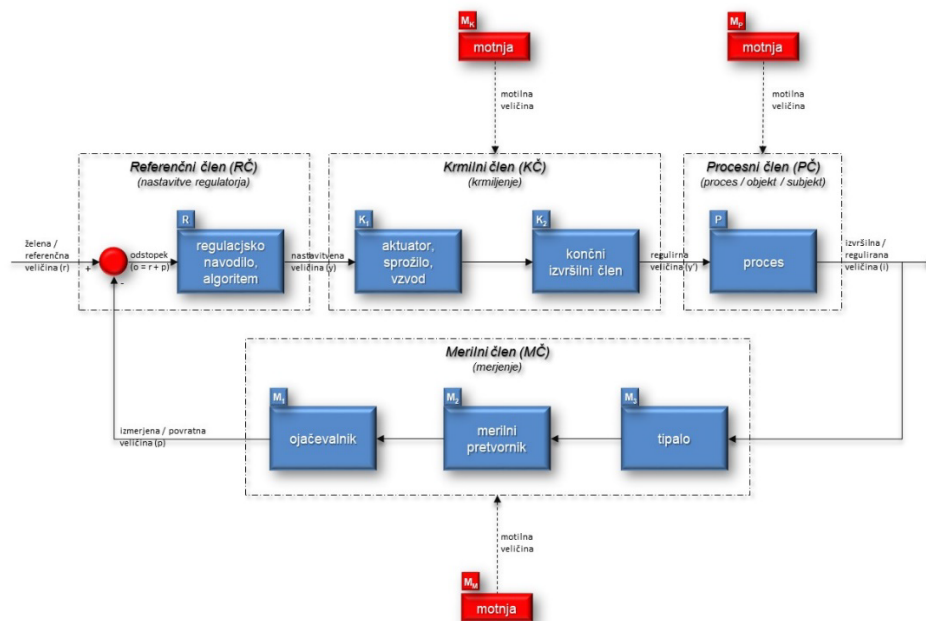
Vir: lasten.

V regulacijskem krogu mora veljati zaupanje in prepričanje, da bodo vse povratne informacije korektno obdelane in vgrajene v izboljšane komunikacijske procese (Balantič, Fležar, & Balantič, 2005; Balantič, 2002).

Za obravnavanje in obdelavo informacij tudi na področju ergonomije je potreben referenčni člen (RČ), ki primerja podatke o resničnem poteku procesa z zahtevami za njegov potek. V primeru odstopanj od zahtev mora sprožiti potrebne spremembe v delovanju. V referenčnem členu (RČ) so zapisane zahteve za delovanje sistema. V sporočilni poti sledi t. i. krmilni člen (KČ), ki krmili procesni člen (PČ) in tako ustrezno modulira (spreminja) signal oz. informacijo. KČ krmili informacijski tok v PČ in s tem omogoča in hkrati regulira opravljanje posamezne delne funkcije. Pomnilnik mora biti dovolj neposredno povezan z merilnim členom (MČ), lahko pa je celo njegov sestavni del. MČ zbira podatke o resničnem (dejanskem) poteku procesa. MČ ugotavlja, kakšen je izhod iz PČ – neposredno uravnavanje, in ugotavlja, kakšno je delovanje PČ – posredno uravnavanje. Podatke, ki jih zbere MČ, je potrebno urediti, razvrstiti, primerjati v RČ.

Vseskozi se v celem sistemu lahko pojavljajo motnje, ki delujejo na vse člene regulacijskega kroga, najpogosteje pa delujejo na procesni člen (PČ), krmilni člen (KČ) in tudi na merilni člen (MČ).

Motnje (vplivi iz okolja) povzročajo, da sistem ne deluje tako, kot je zahtevano s smotrom delovanja. Izhodna veličina ( $i$ ) se ne ujema z zahtevami oz. procesni člen (PČ) ne deluje v skladu z zahtevanim alternativnim predpisom za delovanje. Sistem naj ima sposobnost nevtraliziranja vpliva motenj (če so v pomnilniku vsebovana vsa odstopanja od zahtevanega delovanja) (slika 8) (Balantič, Jarc Kovačič, & Balantič, 2014).



Slika 8: Osnovna struktura regulacijskega kroga

Vir: lasten.

## 5 Industrija 4.0

Pametne tovarne in pametni izdelki. Ko se srečamo s pojmom Industrija 4.0, verjetno večina pomisli prav na navedeni vzklik, toda tudi najbolj sodobna tovarna ni pametna kar sama po sebi.

Industrija 4.0 (I 4.0) v bistvu sloni na realno uporabni kibernetiki (ključni element je povratna zveza/merilni člen (slika 8)), na internetu stvari (IoT), računalništvu v oblaku in na kognitivnem računalništvu. To iniciativo je oblikovala in podprla nemška vlada. V ZDA tega pojma ne poznajo, pač pa se podobna iniciativa imenuje Smart Manufacturing Leadership Coalition (SMLC). To iniciativo pa so podprle velike multinacionalke.

Izraz I4.0 izhaja iz pobude, ki jo je nemška zvezna vlada predstavila na hannovskem sejmu leta 2001. Abstraktna ideja o industriji 4.0 je kmalu prerasla v strategijo nemških podjetij, katere cilji so usmerjeni v ustvarjanje pametnih izdelkov, postopkov in procesov ter pametnih tovarn. Strategijo I4.0 je podprla celotna

Evropska unija, in sicer tudi finančno preko številnih razpisov v okviru evropskega raziskovalnega programa Horizon 2020. Slovenija je cilje I4.0 integrirala v Strategijo pametne specializacije (SPS) (Evropski strukturni in investicijski skladi, 2017).

Pametne tovarne so sposobne izdelovati dobrine z večjo učinkovitostjo in so manj podvržene zunanjim vplivom ter zastojem. V pametni tovarni bodo ljudje, stroji, izdelki in drugi viri komunicirali drug z drugim na način, kot to omogočajo socialna omrežja. Objekti v pametni tovarni bodo lahko sami komunicirali s kupci in z dobavno verigo. S tem bodo močno povečali učinkovitost proizvodnega procesa ter poskrbeli za skrajšanje pretočnih časov (Herakovič, 2015).

Ko razmišljamo o razvoju in rasti, moramo upoštevati, da se v Sloveniji veliko podjetij in organizacij ni sposobno transformirati v okvire I4.0 z razvojem visokotehnoloških izdelkov, zato je smiselno razmišljati o zniževanju proizvodnih stroškov. Ob tem razmišljanju se takoj pojavi pojem "lean" oz. vitkost. Danes je v splošni uporabi nešteto izdelkov iz nabora sodobne informacijsko-komunikacijske tehnologije (pametni telefoni, tablice, prenosniki, storitve v oblaku, kolaborativni roboti ...), ki pa zaenkrat še ne izkoriščajo polne tehnološke danosti. Današnja proizvodnja je še vedno preveč "ožičena" in premalo dosledna glede natančnega pozicioniranja izdelkov v prostoru, prepoznavanja trenutnega stanja v delovnem okolju in s tem s premajhno možnostjo deterministične doslednosti v tehnoloških postopkih.

Zaradi zunanjih konkurenčnih dejavnikov, predvsem zaradi pritiska trga po krajših delovnih ciklih oz. po skrajšanju pretočnih časov, zaradi potreb po bolj individualizirani proizvodnji, zaradi povečane mednarodne konkurence in tudi zahtev po visoki in ponovljivi kakovosti izdelkov itd. uvajamo v proizvodnjo različne spremembe in optimizacijske pristope, kot sta vitka organizacija in modularna gradnja sistemov, procesov in tudi izdelkov, namesto hierarhičnosti distribuiranih sistemov, brezžične komunikacije, spreminjajoče se lokacije modulov proizvodnih sistemov, natančnega pozicioniranja delov in izdelkov, da vemo, kje so itd. Vsi ti ukrepi zagotovo prispevajo k povečanju učinkovitosti in konkurenčnosti proizvodnje in k bolj racionalni rabi energije. Še vedno pa to ni pametna tovarna. Pametni izdelki, stroji, postopki, procesi itd. so fokus I 4.0. Vse skupaj lahko imenujemo pametne tovarne, ki so ključni steber I 4.0 in bodo morale biti sposobne upravljati kompleksne procese ter sisteme, izdelovati dobrine z večjo učinkovitostjo in biti manj podvržene zunanjim vplivom ter zastojem. V pametni tovarni bodo



ljudje, stroji, izdelki in drugi viri komunicirali drug z drugim, kot to omogočajo socialna omrežja. Posebej je mogoče treba poudariti, da bodo lahko objekti v pametni tovarni sami komunicirali s kupci in predvsem tudi z dobavno verigo, s čimer bodo močno povečali učinkovitost proizvodnega procesa ter skrajšali pretočne čase. Zaradi vsega navedenega bo morala imeti pametna tovarna standardizirane mrežne vmesnike, ki bodo omogočili komunikacijo, edinstveno identiteto in spomin, avtonomnost, možnost lokaliziranja v vsakem trenutku in, kar je še posebej pomembno, vsi procesi, postopki, izdelki, stroji in storitve bodo morali biti popisani z modeli v digitalnem okolju (Herakovič, 2016).

V vsem tem informacijskem blodnjaku bo potrebno poskrbeti za varnost podatkov, saj se bo celotno delo preselilo v oblak in na tuje najete strežnike. Ogromne količine podatkov se bodo pretakale v realnem času, na informacijskih odvzemnih točkah pa bo potrebno podatke selekcionirati in jih zaupati za to odgovornim in verificiranim subjektom.

## **6 Digitalni dvojčki**

### **6.1 Modeliranje**

Kako načrtovati in preizkusiti velike delujoče sisteme, npr. ladje, letala, turbine ipd.? Klasična znanja s področja modeliranja nas seznanjajo z modelno teorijo, s katero si pomagamo pri preizkušanju izjemno dragih izdelkov. Proučevanje kompleksnih lastnosti velikih sistemov je povezano z modelno teorijo in uporabo brezdimenzijskih števil, kot so Reynoldsovo število ( $Re$ ) za pretok tekočin, Arhimedovo število ( $Ar$ ) za proučevanje vpliva gostote tekočin, Rayleighovo število ( $Ra$ ) za proučevanje vzgona tekočin, Eulerjevo število ( $Eu$ ) za proučevanje hidrodinamike, Strouhalovo število ( $Sr$ ) za dinamiko tekočin, Machovo število ( $Ma$ ) za dinamiko plinov, Sherwoodovo število ( $Sh$ ) za prisilni prestop toplote, Nusseltovo število ( $Nu$ ) za prenos toplote, Pecletovo število ( $Pe$ ) za prestop toplote itd. Našteli smo nekaj klasičnih brezrazsežnih števil, ki jih uporabljamo v energetskem strojništvu. Uporaba teh modelnih števil morda še najbolj spominja na sodobno obliko modeliranja, ki ga dandanes izvajamo s pomočjo digitalnih dvojčkov – DD (angl. Digital Twin - DTwin). Digitalni dvojček je v bistvu digitalni dvojnik določenega fizičnega predmeta ali procesa, ki ga lahko proučujemo v digitalnem svetu, ugotovitve pa prenesemo v realno fizično okolje, le da tokrat nimamo v mislih le naštetih brezdimenzijskih števil, pač pa neskončno množico

abstrahiranih primerov, kjer pri proučevanju zanemarimo nepomembne veličine in se ukvarjamo le s tistimi, ki imajo za delovanje realnega sistema ključni in vsebinski pomen. Miselna izhodišča, ki temeljijo na proučevanju razmerij pri modelih, lahko s pravilnim razumevanjem neovirano prenesemo v realno okolje. Več spremenljivk je vsaka za sebe lahko sestavljena iz podobnih razsežnosti, kar pomeni, da število spremenljivk lahko zmanjšamo za število teh podobnih razsežnosti. Preostane nam neodvisnost neodvisnih brezrazsežnostnih količin, s katerimi lahko pri simulaciji v modelni teoriji lažje operiramo. Te brezrazsežnostne količine lahko ustvarjamo sami in jih uporabljamo v svojih (lokalnih) primerih. Pri tem nam pomagajo simulacijska orodja, ki npr. na področju ergonomije omogočijo proučevanje delovnih obremenitev pri določeni vrsti človeka (npr. zdrava mlajša ženska, srednje rasti, določenih antropometričnih razmerij, ki živi v centralnem delu Evrope ...). Ob predpostavki, da poznamo vse ergonomske relacije, lahko pridobljena spoznanja simuliramo in tako proučujemo popolnoma drugo vrsto človeka (visokorasli starejši moški, ki živi v Južni Afriki in ima probleme s hrbtenico). Torej nam za razvoj digitalnega vzporednega sveta preostane zbiranje podatkov in proučevanje interaktivnih neodvisnosti, ki jih ujamejo v nabor dinamičnih brezrazsežnostnih količin. V primeru aplikacije na področju ergonomije 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 uporabi podatke, vsebuje običajno uporabljene standardizirane ergonomske metode (OWAS, RULA, REBA). Sodobni modeli temeljijo na senzoriki, umetni inteligenci, fiziki, medicini in inženiringu. DD običajno 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) (Balantič, Balantič, & Jarc Kovačič, 2021).

## **6.2 Razvojna pot DD**

Zgodovinski začetek obdobja digitalnih dvojčkov 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, 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, 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, et al., 2010).

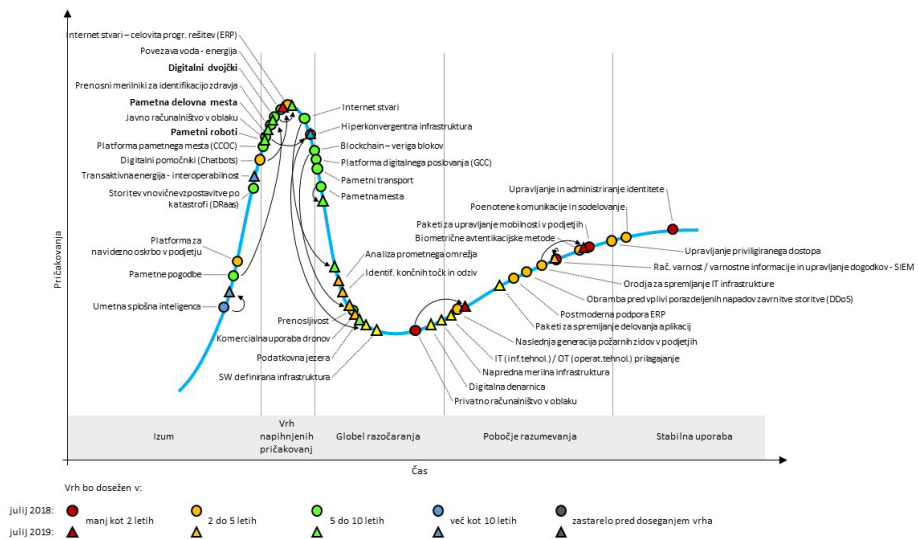
Sodobni dodelani digitalni modeli nam omogočajo pridobivanje in izjemno hitro obdelovanje trenutno zabeleženih fizikalnih podatkov. Analiza teh podatkov omogoča tekoče spreminjanje in prilagajanje odločitvenih postopkov tudi na bazi deduktivne logistike znanih postopkov in njihovih izidov. Vključevanje in rast umetne inteligence (angl. Artificial Intelligence – AI) z vsakim novim trenutkom izboljšuje in krepi povezanost digitalnih dvojčkov v realnem svetu sodobnih sistemov.

## **6.3 Razvoj tehnologij**

Gartner, Inc., ki je vodilno svetovno raziskovalno in svetovalno podjetje in je član S&P 500 (cca. 80 % razpoložljive svetovne tržne kapitalizacije), opredeljuje pojav in razvoj tehnologij, ki v različnih obdobjih dosežejo različne razvojne nivoje. Kdor spremlja omenjene trende, ugotavlja, da se v določenem obdobju na Gartnerjevi

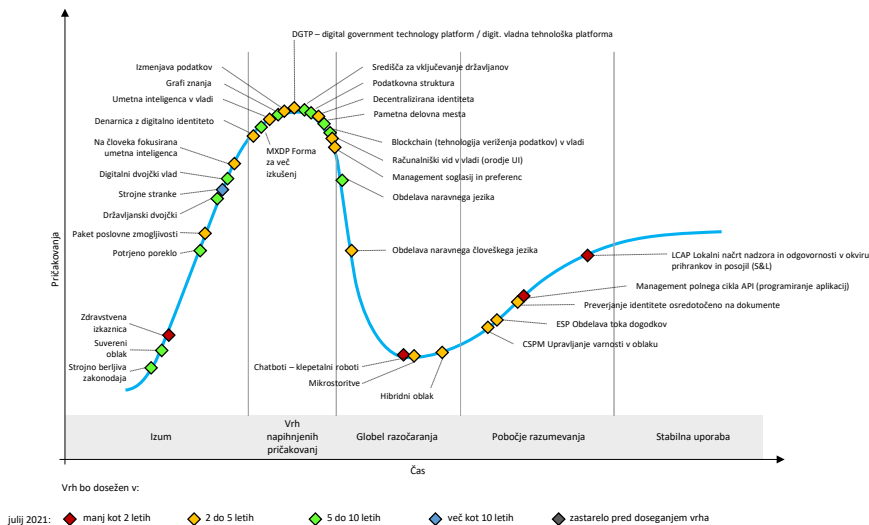
krivulji pričakovanj pojavi določena tehnologija ali struktura, ki ji strokovnjaki napovedujejo razvoj ali zamiranje.

V hitro spreminjajočem se svetu nenehnega razvoja postane današnji dan takoj zgodovina. Če naredimo časovni presek v letih 2018 in 2019 (slika 9), lahko vidimo dinamiko nekaterih tehnologij (premiki na krivulji pričakovanj, označeni s puščicami). Med temi tehnologijami najdemo tudi DTwin/DD, ki je ob prehodu 2018/19 celo okrepil svoj položaj (Gartner, 2018; Gartner, 2019). Na samem vrhu pričakovanj so se poleg digitalnih dvojčkov v omenjenem napovednem območju nahajala tudi pametna delovna mesta in nenazadnje tudi pametni roboti (slika 9).



Slika 9: Splošna uveljavitev tehnologij v 5 do 10 letih glede na leti 2018 in 2019

Vir: (prirejeno po Gartnerju iz leta 2018 in 2019)



**Slika 10: Najboljši strateški tehnološki trendi Gartner za leto 2021**

Vir: (prirejeno po Gartnerju iz leta 2021)

Digitalni dvojčki niso bili edina nova tehnologija, pač pa moramo v tem sklopu omeniti še internet stvari (IS, angl. Internet of things - IoT), umetno inteligenco (UI, angl. Artificial Intelligence - AI), veriženje blokov (VB, angl. Block Chain - BC) in strojno učenje (SU, angl. Machine learning - ML).

Če natančneje pogledamo določene tehnologije, npr. Internet stvari (IoT), vidimo, da so "napihnjena pričakovanja" v letu dni zdrsnila v "globalno razočaranje". Danes je ta tehnologija že v področju razumevanja in stabilne uporabe. Privatno računalništvo v oblaku je imelo tako v letih 2018 in 2019 velik potencial z napovedjo doseganja vrha v manj kot dveh letih, kar se je po ocenah strokovnjakov tudi zgodilo. V letih 2018/19 se je veliko pričakovalo od t. i. Chatbotov (klepetalni roboti/digitalni pomočniki), medtem ko jih v napovedi iz leta 2021 najdemo že blizu dna "globelno razočaranje" (slika 10).

Določeni trendi so popolnoma novi, izrazi zanje pa so v mednarodnem prostoru že oblikovani. Žal pa vsi izrazi še niso oblikovani v slovenskem jeziku, zato dopuščamo možnost, da se bodo z leti oblikovali in privzeli nekoliko drugačna imena, kot ta, ki jih opisujemo.

Gartner na svoji spletni strani že ponuja napoved za 12 najbolj vidnih tehnoloških trendov za leto 2022 (Gartner, 2022):

1. Data Fabric/podatkovna struktura
2. Cybersecurity Mesh/mreža kibernetne varnosti
3. Privacy-Enhancing Computation/računalništvo za izboljšanje zasebnosti
4. Cloud-Native Platforms/oblačne izvorne platforme
5. Composable Applications/sestavljive aplikacije
6. Decision Intelligence/inteligenca odločanja
7. Hyperautomation/hiperavtomatizacija
8. AI Engineering/inženiring umetne inteligence
9. Distributed Enterprises/porazdeljena podjetja
10. Total Experience/popolna izkušnja
11. Autonomic Systems/avtonomni sistemi
12. Generative AI/generativna umetna inteligenca

Predvidevamo, da bo čez nekaj let vsa našeta tehnologija postala cenena oz. dostopna na vsakem koraku, zato jo bomo lahko vse bolj pogosto srečali tudi na področju ergonomije.

Vemo, da so v vseh časovnih obdobjih montažne linije najbolj zapleteni delujoči sistemi, odvisni od neštetihi faktorjev in medsebojno povezanihi spremenljivk. Take sisteme danes vodijo neposredni vodje, ki s svojimi izkušnjami in znanji obdelujejo podatke in načrtujejo delo s preprostimi cilji, ki vodi do pozitivne ekonomike podjetja. Višji nivo odločanja vključuje tudi sisteme za podporo odločanju, ki jih imenujemo digitalni dvojčki (DD). Z njihovo pomočjo lahko simuliramo zelo specifične zahteve, ki izhajajo iz različnosti zaposlenih, kot je antropometrija človeka, rasa, spol, starost, stopnja stresa, pojav utrujenosti, bolezen itd.

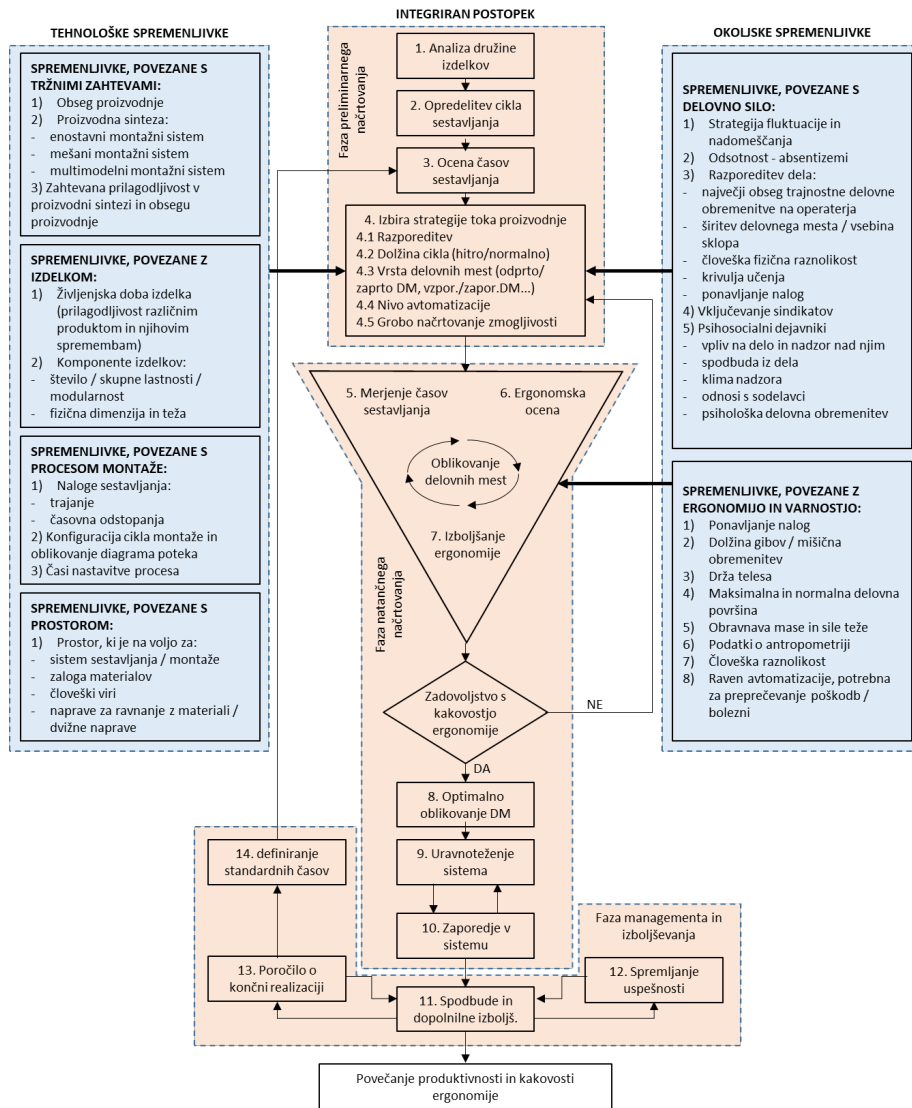
Najbolj izpostavljena so področja, kjer v danem trenutku ni na razpolago dovolj znanja in resursov, kar se pogosto pokaže pri načrtovalcihi (tehnologi, konstruktorji, organizatorji, logistiki ...), ki včasih premalo poznajo ergonomijo ali ji ne posvečajo dovolj pozornosti. Razveseljivo je, da se v organizacijah 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 (Balantič, Balantič, & Jarc Kovačič, 2021).

## **7 Metodološki okvir izboljšanja produktivnosti in ergonomije**

V metodologiji načrtovanja delovnih mest se pogosto srečamo z dejstvom, da ergonomsko oceno izdelajo strokovnjaki s področja ergonomije, delovna mesta pa načrtujejo konstruktorji in tehnologi. Zaradi teh razhajanj se pogosto soočamo s produktivnostjo, nižjo od zelene. Zaradi teh morebitnih pomanjkljivosti lahko v načrtovanje izboljšav vključimo fizikalno, kognitivno in organizacijsko ergonomijo, metode študija dela, medicino dela itd.

Na sliki 8 je prikazan 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.



Slika 11: Metodološki okvir za potrjevanje zasnove oblikovanja delovnega mesta na podlagi ergonomskih analiz

Vir: prirejeno po (Battini, Faccio, Persona, Sgarbossa, 2011)

Diagram poteka (slika 11) prikazuje integrirani postopek, razčlenjen v 14 korakov, ki so zajeti v tri faze:

- faza preliminarnega načrtovanja (1, 2, 3 in 4),



- faza natančnega načrtovanja (5, 6, 7, 8, 9 in 10) in
- faza managementa in izboljševanja (11, 12, 13 in 14).

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.

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 (Balantič, Balantič, & Jarc Kovačič, 2021).

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, 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 & Cort, 2019). V zadnjih letih pa se na trgu pojavlja tudi orodje ViveLab Ergo.

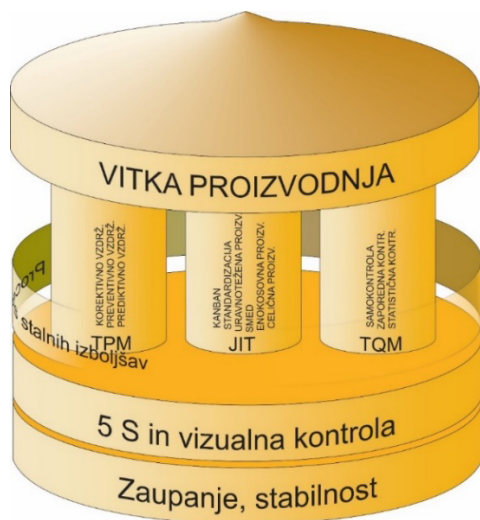
## 8 Vitkost

Pogosto rečemo, da je ergonomijo potrebno živeti, saj je to pravzaprav razmišljanje o optimalnem delovnem prostoru, minimalnih obremenitvah, humanizaciji dela, racionalizaciji in podobnem – živeti ergonomijo je neke vrste življenjska filozofija, ki se vsak trenutek zaveda korektnih relacij med človekom in okolico. Nekaj podobnega bi lahko trdili tudi za vitkost, ki jo vpeljemo v proizvodnjo, le da jo razumemo kot neke vrste minimalizem v proizvodnji/proizvodnji. Vitka proizvodnja (angl.: Lean production) mora biti vseobsegajoč projekt lastnikov, managementa, razvoja, konstrukcije, tehnologije, proizvodnje, marketinga, vzdrževanja in skupnih, presečnih enot določene organizacije oz. podjetja. V okviru vitke proizvodnje teče

veliko bolj ali manj znanih ter bolj ali manj uspešnih procesov, kot so Just in time, Kaizen, 6 sigma, 5S oz. 6S, TQM, SMED, OEE ... (slika 12)

Vsi procesi si prizadevajo delo opraviti z minimalnimi časovnimi in ekonomskimi izgubami, filozofija vitkosti želi odpraviti neproduktivne zastoje, želi zmanjšati transport, zaloge, želi odpraviti pojav nenačrtovanih napak, kadrovske zablode ... V okviru filozofije vitkosti naj bi delo opravili s čim manjšim človeškim naporom in največjo stopnjo kakovosti. Želimo se hitro odzivati in slediti željam kupcev ter učinkovito proizvajati produkt z zagotovljenim kakovostnim vzdrževanjem. V tem procesu je človeku dodeljen dobršen del odgovornosti, saj je s sistemom vlečenja materiala skozi proizvodnjo (angl.: pull) prevzel stalno kontrolo kakovosti vsak posameznik sam.

Trije stebri in dva procesa z vidika ergonomije osvetljujejo pogoje dela za človeka na določenem delovnem mestu, omejevanje obremenitev, zmanjševanje vplivov okoljskih parametrov na človeka, oblikovanje delovnih priprav in postopkov dela s skrbjo za zdravje zaposlenih itd. Delo je treba oblikovati tako, da se poleg manjše obremenjenosti zaposlenega zmanjšajo tudi izgube časa in materiala ter da omogočimo še višjo kakovost.



**Slika 12: Osnovni elementi vitke proizvodnje**

Vir: (Balantič, Polajnar, & Jevšnik, 2016)

Pri načrtovanju moramo biti še posebej pozorni na izboljševanje varnosti in zdravja pri delu. Oblikovanje lahko razdelimo na štiri osnovna področja, in sicer ergonomsko oblikovanje delovnega mesta, študij gibov, oblikovanje in uporaba delovnih priprav ter tehnološko oblikovanje.

Če hočemo, da sistem v praksi deluje, je treba zaposlene poučiti in jih spodbujati k zavestnemu razvoju vitkega razmišljanja. Strategija vitkosti je na prvi pogled enostavna, vendar je dejansko bolj zapletena, saj od vsakega zaposlenega zahteva spremembo filozofije proizvodnje (Balantič, Polajnar, & Jevšnik, 2016).

## **9 Integracija ergonomije v I4.0**

I4.0 bo s pomočjo informacijske tehnologije preko omrežij informacijskih sistemov povezala stroje, naprave, procese, delovna sredstva in tudi aktivne upravjalce – ljudi, ki bodo sodelovali v teh sodobnih procesih. Vsa informacijska tehnologija, ki je trenutno v uporabi, in rešitve, ki šele prihajajo (inteligentni vid, uporaba dronov, avtonomija upravljanja sistemov, krajšanje delovnega časa ...), se bo kljub skokovitemu razvoju morala ukvarjati tudi z vprašanjem človeških faktorjev, ki se spreminjajo v okvirih evolucije. Človek se bo še naprej moral ukvarjati s težavami zaradi preobremenitev, ki bodo v prihodnosti morda fokusirane v drugačno polje naše biti. Že danes se ukvarjamo s težavami, ki se kažejo v kostno-mišičnih obolenjih. Prav te težave se še vedno vztrajno povečujejo in pomikajo v vse bolj zgodnje življenjsko obdobje. Čeprav v okviru I4.0 govorimo o avtomatizaciji in prepletenosti raznih krmilnih in regulacijskih sistemov, bodo človeški faktorji še vedno postavljali meje zmogljivosti najbolj inteligentnih sesalcev (Balantič, Polajnar, & Jevšnik, 2017).

Ker bo tradicionalna množična proizvodnja kmalu stvar preteklosti in jo postopoma nadomešča serijska proizvodnja prilagojenih posameznih kosov, je namen inteligentnega povezovanja vseh postaj v verigi dodane vrednosti doseči prilagodljivo in prilagojeno proizvodnjo. Da bi to uspelo, morajo višje in nižje razvrščeni procesi v proizvodnji stalno med seboj izmenjevati podatke in to na vseh stopnjah proizvodnega procesa. To ne pomeni, da se bo industrijsko delovno okolje močno spremenilo, pač pa to pomeni, da nove tehnologije (internet stvari, 3D tisk, avtonomni roboti, simulacije, masovni podatki, navidezna resničnost ...) zahtevajo vzporedni razvoj ergonomije in njeno vključevanje na vseh možnih nivojih proizvodnje. Edini način, s katerim lahko proizvodna podjetja v današnjem hitro

spreminjajočem se okolju I4.0 ostanejo konkurenčna, je izvajanje fizikalne, kognitivne in organizacijske ergonomije kot del celovitega pristopa, upoštevajoč procese nenehnega izboljševanja (slika 13).

Ergonomska načela tako še naprej igrajo pomembno vlogo pri oblikovanju delovnih mest, saj v veliki meri pomagajo povečati produktivnost in zdravje zaposlenih. Pri tem je ključnega pomena individualizacija delovnega mesta. Primer so delovni stoli in mize z nastavljivo višino, ki jih je mogoče popolnoma prilagoditi vsakemu telesu. Preoblikovanje stoječega delovnega mesta v sedeče (in obratno) je prav tako enostavno izvedljivo. Še več, prilagojeno pozicioniranje materialov in orodij na delovni mizi preprečuje neenakomerno fizično obremenitev. V delovnih okoljih je pogosto spregledano, da prava osvetlitev delovnega mesta pripomore k povečanju delavčeve koncentracije in s tem pripomore tudi k zmanjšanju tveganja za pojav napak. Modularno zasnovan sistem delovne mize omogoča enostavno prilagajanje tako potrebam delavca kot zahtevam delovnega procesa.



Slika 13: Symbioza ergonomije in I4.0

Vir: lasten.

Z uporabo nastavljivih monitorjev (višina, globina, naklon, rotacija), ki zagotavljajo, da je delovni prostor organiziran natančno in po meri delavca, se prepreči nepotrebno fizično naprežanje. Ker se kljub naraščajočemu trendu avtomatizacije nikoli v celoti ne bomo mogli izogniti nalogam ročnega sestavljanja, je ergonomijo v

I4.0 potrebno obravnavati kot način zmanjšanja obremenitev zaposlenih (Item, 2019).

Način dela se bo v prihodnosti povsem spremenil, saj se bo v realni svet povsem integriral tudi virtualni svet. Pridružujemo se mnenju strokovnjakov z raznih področij, da razlogov za strah, da bodo roboti v proizvodnji v celoti nadomestili delavce, ni. Res je, da se število rutinskih del že danes zmanjšuje na račun dela, ki ga opravijo klasični ali kolaborativni roboti. Povečalo pa se bo število delovnih mest z višjo dodano vrednostjo. Bistvo I4.0 je namreč usposobiti človeka za sodelovanje z inteligentnimi stroji in napravami. Posamezna celična delovna mesta danes opremljamo z video kontrolniki in vodiči. Delavec na delovnem mestu lahko dobiva sprotna video in grafična navodila za delo. Navodila so jasna in nedvoumna, tako da "I4.0 mentor" brez težav uvede delavca v delo. Uvajanje lahko poteka krajši ali daljši čas – toliko, kolikor je potrebno za normalno vključitev v delovni proces z ostalimi zaposlenimi.

I4.0 mentor lahko "govori" več sintetičnih jezikov in s tem zlahka premosti kulturne in jezikovne ovire pri vpeljevanju tujca v delo. V tovarnah prihodnosti od človeka pričakujemo interdisciplinaren pristop, hitro sprejemanje lastnih odločitev in hitro prilagajanje zapletenim procesom. Kot rečeno, se z razvojem I4.0 razvija tudi ergonomija, ki s pridom izkorišča nove tehnologije. V konceptualni načrt ergonomije je vse pogosteje vključena virtualna ergonomija, s pomočjo katere je mogoče pridobiti dragoceno podporo pri načrtovanju npr. novih proizvodnih linij ali njihovih delov, zmanjšanju potreb po fizičnih prototipih in skrajšanju časa in predvsem zmanjšanju stroškov razvoja. Virtualna ergonomija omogoča oceno vplivov vpeljave človeških dejavnikov v virtualna okolja, ustvarjena za prototipe izdelkov in procesov, virtualne lutke, digitalne biomehanske modele, ki simulirajo človeka, tako s kinematičnega kot dinamičnega vidika. Uporaba digitalnih modelov omogoča matematični opis gibanja delavca med delovnimi operacijami, ki so vzporedne s tehnikami vizualizacije virtualnih okolij. Industrija 4.0 se sooča tudi z izzivi razvoja, usposabljanja in upravljanja zaposlenih za potrebe okolja I4.0. Tovarna prihodnosti vzpostavlja novo raven interakcije med človekom in strojem. Vloga človeka se spreminja, saj ga bo novo digitalno okolje usmerjalo k novim izkušnjam in od njega zahtevalo več strokovnega znanja za načrtovanje, uporabo in nadzor inteligentnih strojev, ki mu bodo pomagali pri lažjem in varnejšem izvajanju delovnih nalog (Balantič, Balantič, & Jarc Kovačič, 2019).

Zaposleni so odgovorni za zdravje in kompetence, delodajalci pa za organizacijo in urejanje dela. Tako zaposleni kot delodajalec morata med seboj intenzivno sodelovati. Zaposleni pridobijo znanje o varnem in zdravem načinu življenja na delovnem mestu, ki ga lahko prenesejo tudi v svoj življenjski slog in tako izboljšajo svoje zdravje. Bolj zdrav delavec je bolj zadovoljen, hkrati pa pomeni tudi manjše stroške za delodajalca in zdravstveno zavarovalni sistem zaradi bolniških odsotnosti. Vsaka znanstvena ali strokovna disciplina zahteva definicijo ključnih kompetenc, saj potencialni zaposleni lahko v njih tudi vidi pravi izbor svojega strokovnega profila. Proaktivna ergonomija vnaprej rešuje probleme zaradi neustreznih človeških faktorjev, medtem ko reaktivna ergonomija te težave ureja potem, ko so težave že nastopile (Balantič, Jarc Kovačič, & Balantič, 2018).

Ključne kompetence iz ergonomije lahko uporabimo na različne načine:

- razvoj kurikuluma (nabor učnih vsebin) v ergonomiji,
- razvoj celovitih in nepristranskih ocen za razvoj kompetenc,
- priznavanje usposobljenosti diplomantov, ki imajo ergonomske kvalifikacije, priznane s strani uradnih ustanov za potrjevanje ergonomije.

Kompetence vključujejo več kot samo znanja in spretnosti, saj vključujejo še sposobnosti zadovoljevanja opredeljenih zahtev in vedenje, kar pa je bistveno za uporabo spretnosti. V ergonomiji je zagotavljanje kompetenc izrazito povezano s ključnimi odgovornostmi, dejavnostmi in nalogami, opredeljenimi pri ocenah tveganja, in to za vse, ki so povezani v sistem zagotavljanja varnosti in zdravja pri delu – vključno z managerji.

## Literatura

- Balantič, B., Jarc Kovačič, B., & Balantič, Z. (2014). Model sporočilnih poti v sistemu reflektivne prakse za spodbujanje sinergije med pedagoškim in poslovnim okoljem. *Uporabna informatika*, 173-181.
- Balantič, Z. (2002). The man-work-efficiency electronic publication and multimedia supported study. *Current trends in commodity science: proceedings of the 7th International Commodity Science Conference*, (str. 14–19). Poznań.
- Balantič, Z. (2012). Sistemske pogled na ergonomijo. *Delo in varnost; revija za varstvo pri delu in varstvo pred požarom*, 48–54.
- Balantič, Z., Balantič, B., & Jarc Kovačič, B. (2019). Konceptualni načrt vpetosti ergonomije v I4.0. *Vzgoja in izobraževanje v informacijski družbi / Education in Information Society* (str. 19–22). Ljubljana: IJS.
- Balantič, Z., Balantič, B., & Jarc Kovačič, B. (2021). Digitalni dvojčki v ergonomskih ureditvah delovnih mest. *40. mednarodna konferenca o razvoju organizacijskih znanosti* (str. 43–55). Virtualni prostor MS Teams: Univerza v Mariboru.

- Balantič, Z., Fležar, M., & Balantič, B. (2005). Interactive multimedia learning environment (IMLE) for patients' understanding of respiratory system. *WSEAS transactions on communications* (str. 921–928). Athens, New Jersey: WSEAS.
- Balantič, Z., Jarc Kovačič, B., & Balantič, B. (2018). Od znanja do kompetenc v ergonomiji. 37. mednarodna konferenca o razvoju organizacijskih znanosti (str. 57–69). Portorož: Univerzitetna založba Maribor.
- Balantič, Z., Polajnar, A., & Jevšnik, S. (2016). *Ergonomija v teoriji in praksi*. Ljubljana: Nacionalni inštitut za javno zdravje.
- Balantič, Z., Polajnar, A., & Jevšnik, S. (2017). Izzivi človeških faktorjev v industriji 4.0. *IRT 3000 - inovacije, razvoj, tehnologije, letn.12/4*, 178–182.
- 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.
- Budnick, P. (2001). Commentary: What is Ergonomics Really About? *Ergo Web Ergonomics Today*.
- Evropski strukturni in investicijski skladi. (2017). *Slovenska strategija pametne specializacije S4*. Pridobljeno iz str. 20:  
[https://www.eu-skladi.si/sl/dokumenti/kljucni-dokumenti/s4\\_strategija\\_v\\_dec17.pdf](https://www.eu-skladi.si/sl/dokumenti/kljucni-dokumenti/s4_strategija_v_dec17.pdf)
- 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>
- Gartner. (januar 2022). *Gartner*. Pridobljeno iz Gartner Top Strategic Technology Trends for 2022:  
[https://www.gartner.com/en/information-technology/insights/top-technology-trends?utm\\_source=press-release&utm\\_medium=promotion&utm\\_campaign=RM\\_GB\\_2022\\_ITTRND\\_NPP\\_PR1\\_TT12&utm\\_term=hubpage](https://www.gartner.com/en/information-technology/insights/top-technology-trends?utm_source=press-release&utm_medium=promotion&utm_campaign=RM_GB_2022_ITTRND_NPP_PR1_TT12&utm_term=hubpage)
- 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.
- Herakovič, N. (2015). Izzivi industrije 4.0. *Avtomatizacija streg in montaže 2015 - ASM'15*. Ljubljana.
- Herakovič, N. (2016). Nekateri tehnološki izzivi Industrije 4.0. 1, str. 10–16.
- Item. (20. 08 2019). *Your ideas are worth it*. Pridobljeno iz Industry 4.0 in production – the ergonomic aspect: <https://item24us.news/industry-4-0-in-production-the-ergonomic-aspect/>
- Jastrzębowski, W. B., Koradecka, D., Baluk-Ulewiczowa, T., & Gołębiowska, A. (1997). *Rys ergonomji czyli nauki o pracy opartej na prawdach poczerpniętych z nauki przyrody : 1857*. Warszawa: Instytut Ochrony Pracy.
- Marmaras, N., Poulakakis, G., & Papakostopoulos. (1999). Ergonomic design in ancient Greece. *Applied Ergonomics*, 30 (4), 361–368.
- McCormick, E. J. (1970). *Human Factors Engineering*. New York: McGraw-Hill.
- Murrell, K. (1965). *Ergonomics, Man in his working environment*. London: Chapman and Hall Ltd.
- 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>
- Okorji, I. G. (januar 2022). *Occupational safety and health*. Pridobljeno iz Workplace environment and ergonomics, The history of ergonomics: <https://cupdf.com/document/chapter-7-workplace-environment-and-ergonomics.html>
- Pheasant, S., & Haslegrave, C. (2005). *Bodyspace: Anthropometry, Ergonomics and the Design of Work, Third Edition*. London: Taylor & Francis Ltd.

- Piasecik, 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*.
- White, C. M. (2008). Ergonomics: What is it? Clearing away the confusion. *C.P.E. Michigan Gamma '99*, (str. 24–27). Michigan.