

NAČRTOVANJE HIBRIDNIH DELOVNIH MEST ČLOVEK-STROJ SKOZI VIDIKA VITKOSTI IN ERGONOMIJE

BRIGITA GAJŠEK

Univerza v Mariboru, Fakulteta za logistiko, Celje, Slovenija
brigita.gajsek@um.si

Delovna mesta se v času prehajanja v Industrijo 4.0 preurejajo iz povsem ročnih preko hibridnih človek-stroj v avtomatizirana, avtonomna in pametna. Vsaka omenjena oblika ureditve delovnega mesta sama zase predstavlja razvojni izziv. Poseben izziv predstavlja razvoj hibridnih delovnih mest, kjer je potrebno v pozitivnem smislu izkoristiti potencial človeka in stroja v največji možni meri. Pri načrtovanju delovnih mest in delovnih procesov se sledi načelom vitkosti, kar se povrne v učinkoviti porabi časa, skozi zmanjšane izgube in načela ergonomije. Vsled pomanjkanja delovne sile in staranja prebivalstva je skrb za ohranjanje zdravja zaposlenih pomembno vodilo načrtovanja ročnih in hibridnih delovnih človek-stroj mest za prihodnost. Poznavanje osnov vitkosti in osnov ergonomije ob sočasnem spoznavanju elektronskega okolja za oblikovanje delovnih mest je lahko dobro izhodišče za preudarno načrtovanje prenove klasičnih delovnih mest v delovna mesta Industrije 4.0.

DOI
[https://doi.org/
10.18690/um.fl.3.2025.6](https://doi.org/10.18690/um.fl.3.2025.6)

ISBN
978-961-286-973-1

Ključne besede:
hibridno delovno mesto,
EAWS,
MTM,
Ema WD,
simulacija



Univerzitetna založba
Univerze v Mariboru

DOI
[https://doi.org/
10.18690/um.fl.3.2025.6](https://doi.org/10.18690/um.fl.3.2025.6)

ISBN
978-961-286-973-1

Keywords:
hybrid workplace,
EAWS,
MTM,
EmaWD,
simulation

DESIGNING HYBRID HUMAN- MACHINE WORKPLACES

BRIGITA GAJŠEK

University of Maribor, Faculty of Logistics, Celje, Slovenia
brigita.gajsek@um.si

During the transition to Industry 4.0, workplaces are being transformed from manual through human-machine hybrids to automated, autonomous and smart ones. Each of the aforementioned designs represents a development challenge. A particular challenge is the development of hybrid workplaces, where using the potential of man and machine to the maximum extent possible is necessary. Lean principles are followed in designing workplaces and processes, reflected in the efficient use of time and minimized losses, as well as ergonomics principles. Due to the lack of labor force and the aging of the population, concern for maintaining employees' health is an important guideline for designing workplaces for the future. Knowing the basics of lean, time management and ergonomics while simultaneously learning about the computer environment for designing workplaces can be a good starting point for the prudent designing of the renovation of traditional workplaces into Industry 4.0 workplaces.



1 Uvod

Uvajanje digitalnih tehnologij in avtomatizacije v industrijsko okolje, vključno s sodelovalnimi ali kolaborativnimi roboti (coboti), algoritmi, umetno inteligenco, internetom stvari (Internet of Things ali IoT), masovnimi podatki in kibernetскими fizičnimi sistemi (Cyber-Physical Systems ali CPS), uvaja novo paradigmo, znano kot četrta industrijska revolucija (Cunha et al., 2022). Četrto industrijsko revolucijo se poimenuje tudi Industrija 4.0 (Industry 4.0 ali I4.0), tovarne prihodnosti (Factories of the Future ali FoF) ali celo pametna proizvodnja (Iordache, 2017; Gualtieri et al., 2020; Kadir in Broberg, 2021). V okviru tega gibanja so predvidene medsebojno povezljive oziroma povezane pametne tovarne, ki bodo omogočale učinkovito zbiranje in obdelavo podatkov, razdeljevanje in vodenje operacij na avtomatiziran način, hkrati pa bodo omogočale operativno spremljanje dogajanja v realnem času (Moro et al., 2019; Çinar et al., 2021). Sledenje predstavljenemu trendu bo nagradilo podjetja s konkurenčno prednostjo. Kaj pa pomeni slediti trendu? To pomeni spreminjati podjetja na način, da se iz novincev transformirajo v zrele predstavnike Industrije 4.0. Del transformacije je tudi preobrazba tradicionalnih delovnih mest, ki vključujejo »ponavljajoče se naloge«. Takšna delovna mesta so na vrhu seznama delovnih mest za avtomatizacijo (npr. Frey in Osborne, 2017) in izboljšanje produktivnosti z uvajanjem sodelovanja med ljudmi in stroji (Stern in Becker, 2019; Broday, 2020).

Opremljeni z novimi tehnologijami, bodo operaterji, ki delajo na delovnih mestih, pri izvajanju svojih dejavnosti sodelovali z obilico tehničnih inovacij. V tem kontekstu je človeški operater – v literaturi poimenovan kot »Operator 4.0« – običajno tipiziran glede na tehnologije, ki jih uporablja pri delu. Na primer, pri uporabi eksoskeletov je delavec prikazan kot super močan operater ali zdrav delavec, ker uporablja pametne nosljive rešitve, ki zbirajo psihofiziološke podatke (Romero et al., 2016a; Ruppert et al., 2018). Nekateri avtorji poudarjajo, da imajo nove tehnologije, predvsem eksoskeleti (nosljive pomožne naprave) in koboti, potencial za izboljšanje produktivnosti in zdravja pri delu (npr. preprečevanje kostno-mišičnih obolenj zaradi zmanjšane obremenitve mišičnega sistema) (Cimini et al., 2020; Ranavolo et al., 2021). Kljub temu uporaba tehnologij samih po sebi ne zagotavlja, da se bo tveganje za kostno-mišične težave zmanjšalo, kot navajajo Cockburn (2021) in Bounouar s soavtorji (2022). Prisotno je tudi prepričanje, da bi uporaba novih tehnologij z razbremenitvijo delavcev - ponavljajočih se in monotonih nalog, lahko

pripomogla k izboljšanju njihovih veščin, zlasti v zvezi z nadzorom delovnega sistema. V tem smislu se lahko pričakuje, da bodo delavci zaradi uvajanja novih tehnologij v delovna okolja bolj kvalificirani in bolj avtonomni kot pred uvedbo (Romero et al., 2016a; Thun et al., 2019; Broday, 2020). Obstajajo pa tudi strahovi, da bo uvajanje novih tehnologij prispevalo k povečanju nadzora nad zaposlenimi (npr. s pomočjo aplikacij za senzorje), k večji intenziteti dela, k spolni segregaciji in k manjši potrebi po odločanju delavca (Piasna in Drahoukoupil, 2017; Moro et al., 2019; Beer in Mulder, 2020; Kaasinen et al., 2020; Kadir in Broberg, 2020; Golsch in Seegers, 2021).

Obseg vplivov tehnološko podprtih sprememb na zdravje delavcev in njihovo delo je še dokaj neznan (Badri et al., 2018; EU-OSHA, 2018; Bobillier Chaumon, 2021; Zorzenon et al., 2022). Zdravstveni izzivi, ki bi lahko izvirali iz I4.0, so:

- težave z duševnim zdravjem zaradi zmanjšane avtonomije in povečanih zahtev po spretnostih),
- povečana kognitivna delovna obremenitev zaradi uporabe oprijemljivih tehnologij za avtomatizacijo, kot so koboti in avtomatizirana vozila,
- občutek negotovosti zaposlitve zaradi povečane uporabe tehnologije (Golsch in Seegers, 2021; Kadir in Broberg, 2021; Reiman et al., 2021).

V skladu s konceptom I4.0 kot »nove industrijske stopnje« so raziskave še vedno prioritarno osredotočene na tehnične vidike, povezane s transformacijami I4.0, ne pa na človeško delo (Neumann et al., 2021; Barcellini et al., 2021; Bentley et al., 2021). Na stranski tir postavljena družbena razsežnost delovnega mesta I4.0 vključuje delovne pogoje, nove modele organizacije dela, načine interakcije delavcev s tehnologijo, nove vire omejitev in virov, ki jih uvaja tehnologija, spreminjajoče se zahteve po spretnostih, priložnosti za učenje ali nastajajoča tveganja, ki bi lahko ogrozila zdravje in dobro počutje delavcev (Barcellini, 2019; Bounouar et al., 2022). Po mnenju Moniz in Krings (2016) se ta vprašanja pogosto obravnavajo le z vidika tehničnih izboljšav in varnosti v smislu interakcije med delavcem in tehnologijo. Z nadaljnjim zanemarjanjem družbene razsežnosti delovnega mesta I4.0 v teoriji in praksi se postavlja pod vprašaj uspeh pristopov I4.0 in njihov vpliv na ljudi, ki so jih prisiljeni prenašati (Neumann et al., 2021).

Pri načrtovanju implementacij I4.0 se je poleg tehnologije potrebno osredotočiti tudi na vidik operaterjev in njihovih delovnih aktivnosti. Poleg zagotavljanja časovne učinkovitosti dela je potrebno raziskati tveganja, katerim bo operater 4.0 med delom izpostavljen in vplive dela na zdravje.

2 Koncept operaterja 4.0 in status človeškega dela v I4.0

Analiziranje transformacije industrije prvenstveno napoveduje razvoj komponent avtomatizacije in samoupravljanja, vendar še vedno temelji na prisotnosti človeka. Namesto, da bi človeka nadomestila tehnologija, je fokus I4.0 po mnenju mnogih raziskovalcev (npr. Cimini et al., 2020; Paliga in Pollak, 2021) na razbremenitvi delavcev od napornih in monotonih nalog ter na razvoju drugačnih veščin, ki delavcem omogočajo upravljanje novih in zapletenih sistemov. Vloga delavca, poimenovanega Operater 4.0, je prevzemanje na novo konfiguriranih dejavnosti v sistemu dela. Trenutno sta viziji, kako to doseči, dve. Prva vizija temelji na predpostavki, da je človeški operater opolnomočen s tehnologijo in transformiran v "pametnega operaterja" na osnovi uporabe pametnih tehnologij (Romero et al., 2016a). Druga vizija temelji na predpostavki, da je operater nevesč obvladovati vse zahteve, ki jih zahteva tehnologija, in bo potreboval usposabljanje in prekvalifikacijo za prilagoditev tehnološkim spremembam (Li, 2022).

Medtem ko se v literaturi še vedno domneva, da bo osrednjo vlogo pri upravljanju sistemov I4.0 imel človek, so definicije operaterja zamegljene in konceptualizirane z eno skupno vizijo, ki jo opišejo Romero et al. (2016a,b). Po mnenju Romera et al. (2016a) so operaterji v I4.0 opredeljeni glede na tehnološke vire, ki jih uporabljajo. Razdeljeni so v sedem glavnih tipologij, ki ne ponazarjajo različnih vrst delavcev, saj se lahko za isto delo uporablja več kot eden od naštetih tehnoloških virov: »super-močni operater«/»super-strength operator« (z uporabo eksoskeleta), »operater z obogateno resničnostjo«/»augmented operator« (z uporabo obogatene resničnosti), »virtualni operater«/»virtual operator« (z uporabo virtualne resničnosti), »zdrav operater«/»healthy operator« (z uporabo pametnih nosljivih rešitev za merjenje fizične aktivnosti delavcev), »pametni operater«/»smart operator« (izkoriščanje razpoložljivih pametnih tehnologij), »sodelujoči operater«/»collaborative operator« (z uporabo kobotov) in »analitični operater«/»analytical operator« (z uporabo in analiziranjem masivnih podatkov, ki jih zbira sistem). Po tej viziji se pričakuje, da bodo pametne tovarne na podlagi interakcije temelječih odnosov med ljudmi in

stroji izkoristile ne le prednosti in zmogljivosti pametnih strojev, temveč tudi opolnomočile njihove operaterje z novimi spretnostmi in orodji (Romero et al., 2016a; Patriarca et al., 2021; Shi et al., 2021). Pričakuje se, da bodo ti operaterji imeli sočasno (1) nadzor nad delovnimi procesi in pripadajočo tehnologijo in (2) avtonomijo med razvijanjem lastnih spretnosti. Zato je Operater 4.0 običajno prikazan kot pameten in usposobljen operater, ki uporablja tehnologijo v skladu s svojimi potrebami (Romero et al., 2016b; Kaasinen et al., 2020), ali z drugimi besedami, »industrijski delavec, čigar kognitivne, senzorične, fizične in interakcijske sposobnosti so izboljšane skozi interakcijo s tehnologijami industrije 4.0« (Gazzaneo et al., 2020, str. 221).

Gajškova s soavtorji (2020) ugotavlja, da tehnologija I4.0 daje Operaterju 4.0 možnost, da se glede na dane okoliščine dela sam odloča, ali bo uporabil tehnologijo, ali ne in kdaj jo bo uporabil. Iz teh razlogov bo I4.0 spremenila delo iz ponavljajočega se, nizko kvalificiranega in fizičnega, v delo, ki vključuje bolj zapletene in kognitivne naloge, saj decentralizirano odločanje delavcem zagotavlja večjo stopnjo avtonomije.

Seveda se je pri tem potrebno zavedati, da več, kot je potrebnih kognitivnih sposobnosti za izvedbo naloge, težje je trditi, da jih je mogoče nadomestiti s tehnologijo (Blštáková et al., 2020; Cimini et al., 2020; Golsch in Seegers, 2021). S tem, ko postajajo delovne zahteve bolj zapletene, lahko ti delovni sistemi zahtevajo več "specializacije, fleksibilnosti, prilagajanja", kar povečuje zahteve kvalifikacij in tehničnih veščin (Blštáková et al., 2020; Ivaldi et al., 2021). Mark et al. (2019) je dodal, da lahko asistenčni sistemi zagotovijo večje možnosti za vključevanje in podporo invalidnim delavcem in z vključitvijo teh delavcev »od začetne faze načrtovanja, se lahko ta potencial poveča, hkrati pa postane industrijski sektor primer najboljše prakse resnično participativnega in vključujočega poslovnega področja«.

Omenjene kvalifikacije in tehnične spretnosti so spodbujene z delovnimi situacijami v določenem kontekstu, razvijejo se med delom (Teiger in Lacomblez, 2013) in ne obstajajo pred pojavom določene delovne situacije. Usposabljanje lahko prispeva k njihovem razvoju, vendar tu ni univerzalnega sistema učenja/usposabljanja na delovnem mestu. Raziskave o digitalnih učnih okoljih so še v razvoju in so v glavnem omejene na predstavitvene/demo aplikacije (EU-OSHA, 2018; Engeström, 1999). Po eni strani lahko tehnologija ustvari možnost za nove oblike usposabljanja na

delovnem mestu, kot so digitalizirana delovna navodila ali virtualno usposabljanje (Hoedt et al., 2020; Chistyakova et al., 2021). Po drugi strani pa bo usposabljanje učinkovitejše z integracijo resničnih delovnih situacij pri delu in z vsakodnevno uporabo tehnologije (npr. Galey et al., 2020).

Koncept Operaterja 4.0 ostaja zamegljen, tako kot status človeškega dela v konceptualizaciji delovnih scenarijev I4.0, ki je še vedno zasenčen s pričakovanji o popolnoma sposobnih, zdravih, mladih, spolno nevtralnih in visokokvalificiranih delavcih, medtem ko se v praksi že pojavljajo številna tveganja in negativni učinki, ki jih ima I4.0 za delavce. Nekaj jih navajamo v poglavjih, ki sledijo. (Cunha et al., 2022)

2.1 Tveganja in vplivi I4.0 na zdravje

Odnos med človekom in tehnologijo se vzpostavi v določenem kontekstu pod vplivom določene oblike organizacije dela. To pomeni, da tehnologija ni univerzalna ali prenosljiva iz enega okolja v drugega, ne da bi imela posledice za dejavnost, ki se v tem okolju razvija. Zato je pomembnejše od prepoznavanja s tehnologijo povzročeni tveganj to, da jih je treba razumeti glede na njihov specifični izraz v kontekstih, v katerih se pojavljajo (Adriaensen et al., 2019).

Čeprav je avtomatizacija privedla do zmanjšanja ročnega dela, to ne pomeni, da so fizična tveganja popolnoma odstranjena z delovnih mest. Avtomatizirane naprave lahko povzročijo tudi mehanske in električne nevarnosti, tudi hrup, vibracije in izpostavljenost kemikalijam ali sevanju (Leso et al., 2018; Hoyer et al., 2020; Costantino et al., 2021). Pojavljajo pa se tudi manj oprijemljiva tveganja, ki običajno ostanejo nevidna, zlasti psihosocialna tveganja (Badri et al., 2018; Bobillier Chaumon et al., 2019; Costantino et al., 2021). Še posebej prisotni so: neredni delovni urniki (npr. 12-urne izmene) zaradi neprekinjenega dela v izmenah, spodbujenega z avtomatizacijo (Cunha et al., 2020), povečan pritisk zaradi opravljanja dela s hitrostjo kobota in višja raven nadzora dela zaradi uporabe sistemov za spremljanje in sledenje. Takšni delovni pogoji negativno vplivajo na telesno in duševno zdravje ljudi in se lahko izrazijo kot kostno-mišična obolenja, tehnostres ali anksioznost (Valenduc in Vendramin, 2016; EU-OSHA, 2018; Ghislieri et al., 2018). Poleg tega se učinki lahko izrazijo tudi kot bolečina ali trpljenje pri delu. Slabšanje zdravja je mogoče preprečiti s spremljanjem in poseganjem v dejavnike tveganja. Razmah robotike bi lahko povečal izolirano delo in zmanjšal stik zaposlenih s sodelavci, kar lahko prispeva k percepciji delavcev, da izgubljajo nadzor nad svojimi poklicnimi

praksami in nad kolektivnimi merili, ki se uporabljajo za kakovostno in zdravo opravljanje dela (Bobillier Chaumon et al., 2019).

Medtem ko lahko nove tehnologije dodajo vrednost delu, lahko tudi omejijo aktivnosti delavca skozi (1) krepitev oblik predpisovanja dela in (2) z zmanjšanjem operativnega manevrskega prostora delavca. Na ta način delavcu ni dovoljeno uporabiti strokovno znanje in izkušnje za doseganje dobro opravljenega dela, skozi katerega se delavec potrjuje in skozi katerega želi, da ga prepozna kolektiv. To je ključnega pomena za identiteto delavcev in je temelj duševnega zdravlja in dobrega počutja pri delu (Bobillier Chaumon et al., 2019). Kot navajajo Thun et al. (2019) bi lahko z napredkom avtomatizacije bila ogrožena avtonomija delavcev.

Številne študije o I4.0 so se osredotočile zgolj na tehnične vidike zasnove, pri čemer so ignorirale ali le delno upoštevale družbene odnose, ki jih podpirajo (Sony in Naik, 2020). Ker so celo fizične težave, kot so kostno-mišično obolenja, povezane z organizacijskimi in psihosocialnimi dejavniki dela, njihovega preprečevanja ni mogoče analizirati ločeno od konteksta, na katerega se nanašajo in odnosov, ki so v njem podprti (Coutarel et al., 2022). Posledično lahko uporaba teh tehnologij povzroči kontinuiteto negativnih učinkov za delavce, če se te kontekstualne značilnosti spregledajo (Barcellini, 2019). V kvalitativni študiji, ki sta jo izvedla Kadir in Broberg (2020) na podlagi intervjujev s 15 delavci in 20 odločevalci v 10 podjetjih, ki so nedavno uvedla nove digitalne tehnologije, je bilo razkritih več dejavnikov, ki vplivajo na dobro počutje in uspešnost. Znanje o delovanju novih delovnih sistemov, podpora delodajalca, varnost zaposlitve, fizična in kognitivna obremenitev, povezana z uporabo tehnologije, so bili nekateri od teh dejavnikov (Kadir in Broberg, 2020). Še več, avtorji so ugotovili, da so delavci zaskrbljeni zaradi "povzročanja napak ali okvar novih digitalnih tehnologij", saj so vedeli, kako drage so, niso pa bili seznanjeni z njihovo uporabo.

Raziskave na področju psihologije dela in na aktivnosti ergonomije so dosledno pokazale, kako ima razvoj participativnih pristopov bistveno vlogo pri izpostavljenosti delavcev takšnim težavam (Béguin in Cerf, 2004; Barcellini et al., 2015; Bobillier Chaumon, 2021). Ne glede na to, se številne študije še vedno osredotočajo na potencial tehnologije. Na primer, v študiji, ki so jo izvedli Gualtieri et al. (2020), se je ročna montažna postaja preoblikovala v kolaborativno (z uporabo

kobotov) na osnovi analize fizične ergonomske ocene; zgolj s produktivnostjo in fizično izboljšavo v središču razmišljanja.

Vključitev perspektiv delavcev med postopki načrtovanja daje vpogled v določene vrste informacij, ki jih imajo izključno tisti, ki opravljajo delo, saj njihovi pogledi temeljijo na njihovem znanju o tem, kako se delo vsakodnevno izvaja (Rangraz in Pareto, 2021). V povezavi z inovacijskim modelom, ki spodbuja trajnostno vodenje in komunikacijo pri delu (Iqbal et al., 2021), lahko vključevanje delavcev v načrtovanje prispeva k ustvarjanju zaupanja vrednega odnosa med različnimi delovnimi akterji. Tak pristop delavcem omogoča tudi, da vidijo, kako je njihovo delo cenjeno in kako je prispevalo k uspešnosti organizacije (Saabye et al., 2020; Rangraz in Pareto, 2021).

Kljub osnovni težnji paradigme I4.0 po uporabi tehničnih inovacij za ponovno postavitve človeka v središče (glej Saraceno, 2020), so bili človeški in tehnični vidiki dojeti nesorazmerno, na predpostavki, da je prilagoditev operaterjev tehnologiji nujna za zanesljivo delovanje delovnih sistemov. Ne glede na to se zdi, da je pomembnost vloge človeškega operaterja v kontekstu I4.0 v literaturi sedaj potrjena (npr. Fantini et al., 2020; Pacaux-Lemoine et al., 2022). Iz literature tako razberemo, da človeško posredovanje ostaja bistvenega pomena v delovnih okoljih, za katera je značilna prisotnost »heterogenih tehnologij« (npr. koboti, eksoskeleti, kiberfizični sistemi) (Barcellini et al., 2021). Poleg tega, da mora zagotoviti varen in učinkovit vmesnik med številnimi tehnologijami, operater prispeva k zanesljivosti delovnega sistema, na primer s spreminjanjem konfiguracije procesa, ko pride do nepričakovanih dogodkov ali se stroj pokvari, ali z upravljanjem spremenljivosti dela in s predvidevanjem možnih posledic nepričakovanih dogodkov.

Trenutne definicije Operaterja 4.0 na razkrivajo, ali je operater 4.0 zamišljen kot spolno nevtralen in, če je tako, kako spremembe dela in organizacije vplivajo na obstoječe (ali ustvarjajo nove oblike) neenakosti med spoloma, ali kako je segmentacija po spolu povezana s tehnološkim razvojem v dobi I4.0. Študija Cunha et al. (2022) je pokazala, da je segregacija po spolu ostala prisotna tudi po uvedbi avtomatizacije, ob zavedanju, da ta segregacija pri delitvi dela ni neodvisna od dejstva, da so avtomatski stroji podprti z dediščino znanja o ročnem delu, ki so ga pridobivale različne generacije delavcev. Skratka, tehnologija je v interakciji z dimenzijo spola in do sedaj še ni bila neodvisna od spola.

Starajoča se populacija delovne sile, za katero se pričakuje, da se bo še povečevala, predstavlja grožnjo dolgoročni vzdržnosti novih sistemov dela I4.0 (Brozzi et al., 2020). Z velikim številom starejših delavcev, za katere se pričakuje, da bodo ostali aktivni dlje, postanejo potrebe po varnejšem delu, dostopnem vseživljenjskem usposabljanju in zaposlovanju starejših delavcev jasne (Gaudart, 2016). Nekateri avtorji menijo, da je I4.0 ugodna, saj naj bi ti sistemi ohranjali zdravje preko avtomatizacije določenih fizično nevarnih, ponavljajočih se in monotoni opravl (Brozzi et al., 2020; Agnusdei et al., 2021). Vendar pa bodo zahteve I4.0 sistemov po učenju bolj verjetno privilegirale nove (po možnosti mlajše) delavce, ki so »bolje opremljeni za učenje« (Badri et al., 2018, str. 407). Poleg tega pa zgolj uvedba novih tehnologij ne more zagotoviti, da bodo potrebe delavcev po ohranjanju stabilnosti in varnosti pri delu izpolnjene (Longo et al., 2020). Nasprotno, vse večja intenzivnost dela, nenehna potreba po sprotnem prilagajanju specifičnosti proizvodnje, »ki ne upošteva niti istih ritmov niti istih zahtev niti istih ciljev« (Gaudart, 2016, str. 16); ali neredni delovni urniki (npr. Cunha et al., 2020; Rangraz in Pareto, 2021), bi lahko ogrozili trajnost teh novih delovnih sistemov.

2.2 Priložnosti za raziskovanje

Študijski primeri z delavci kot glavnimi udeleženci, ki jim sledi analiza vplivov preureditve dela I4.0 na zdravje in dobro počutje, so nujen korak v prihodnjih raziskavah, glede na to, da je izkušnje dela s temi tehnologijami še potrebno izkusiti, da bi pridobili vpogled v nastajajoča tveganja za pojav obolenj, povezanih z delom. Glede na cilje trajnostnega razvoja (United Nations, 2020) in ugotovitve, da operater 4.0 ni spolno nevtralen delavec, in da ima delo različne učinke na ženske in moške (npr. Messing in Silverstein, 2009), je potrebno razsežnost spola upoštevati tudi pri prihodnjem raziskovalnem delu, ki preučuje takšne vplive za doseganje bolj zdravih (cilj 3), enakopravnejših (cilj 5) in bolj trajnostnih delovnih mest (cilj 8). Ključno vprašanje je torej, kako je lahko tehnologija I4.0 gonilo za doseganje teh ciljev (Cunha et al., 2022)?

3 Simulacija človekovega dela, 3D načrtovanje proizvodnje in virtualna ergonomija s programsko opremo ema Work Designer

Glede na Spitzhahn et al. (2022) za planiranje in načrtovanje proizvodnih in delovnih sistemov je potreben celosten pristop, ki upošteva obe ravni načrtovanja, in sicer načrtovanje tovarne in načrtovanje delovnega mesta. Ločena digitalna orodja se trenutno večinoma uporabljajo za načrtovanje tovarn in podrobno načrtovanje delovnih sistemov. To vodi do tega, da so delavci neustrezno ali prepozno upoštevani v procesu načrtovanja proizvodnje. Posledica je lahko zamudna in draga prenova za reševanje problemov v obstoječih proizvodnih in delovnih procesih. Na primeru montaže pralnih strojev je v nadaljevanju predstavljen iterativni pristop za kombinirano digitalno podprto načrtovanje na ravni tovarne in delovnega mesta. Celostna zasnova montažne linije se lahko izvaja s programsko opremo ema Software Suite, ki jo sestavljata ema Plant Designer (emaPD) in ema Work Designer (emaWD). V študiji primera se emaPD uporablja za optimizacijo proizvodnih elementov, kot so operativni viri, postavitve in logistika, z upoštevanjem pretoka materiala, pretočnih časov in proizvodnih stroškov. Simulacijsko okolje se uporablja za podrobno načrtovanje in načrtovanje na ravni delovne postaje z emaWD, ki uporablja algoritemski pristop za samoiniciativno generiranje gibanja oseb na podlagi objektivnih opisov nalog. Ustvarjene simulacije se pregledajo in optimizirajo na podlagi ocene proizvodnega časa (MTM-UAS) in ergonomskih ocen tveganja (EAWS, NIOSH, analiza dosegov in vida) ter sposobnosti delavcev (starost, antropometrija). Posledično je mogoče načrtovati učinkovito tovarno z optimiziranim pretokom materiala, hkrati pa čim bolj zmanjšati proizvodne stroške in pretočne čase ter upoštevati prostorske specifičnosti in ergonomijo. Prezem ergonomsko neugodnih procesov s strani robotov kot hibridnih delovnih postaj omogoča med drugim izboljšanje ergonomije. Pristop digitalnega načrtovanja kombinacije tovarne (emaPD) in načrtovanja delovnega mesta (emaWD) omogoča tudi zgodnje, usklajeno in učinkovito načrtovanje ekonomične in ergonomsko ustrezne proizvodnje.

3.1 Izzivi načrtovanja ekonomičnih in ergonomsko ustreznih tovarniških in delovnih sistemov

Glede na Spitzhirm et al. (2022) vse večji stroškovni pritisk zaradi konkurence, stroški dela in materiala, večja raznolikost in krajša življenjska doba izdelkov ter kratki cikli lansiranja na trg zahtevajo, da je potrebno proizvodne in delovne sisteme načrtovati in preoblikovati hitreje in pogosteje (Spath et al., 2017, Bracht et al., 2018). Pri planiranju in načrtovanju proizvodnih in delovnih sistemov je potrebno poleg stroškov, časa, kakovosti, časa do trga in fleksibilnosti upoštevati tudi ergonomsko zasnovano za zaposlene ter razporeditev delovne sile na podlagi njihovih spretnosti (Schenk et. al., 2014; Schlick et al., 2018). Pri načrtovanju tovarne/proizvodnje oziroma načrtovanju delovnega sistema običajno sodelujejo različni oddelki. Na ravni načrtovanja tovarne je poudarek na proizvodnem programu, dimenzioniranju prostorov in oblikovanju tovarne in proizvodnih sistemov. Načrtovanje dela se ukvarja z načrtovanjem delovnih mest in procesov, npr. načrtovanjem razporeditve opreme na delovnem mestu ali načrtovanjem interakcije človek-stroj/robot v skladu z ekonomskimi in ergonomskimi merili. Zgodnje, usklajeno in učinkovito načrtovanje tovarne ter proizvodnje in posameznih delovnih mest je pomembno, vendar pogosto ni dovolj natančno izvedeno (Bracht et al., 2018).

Številna podjetja uporabljajo orodja za digitalno načrtovanje in simulacijo svoje tovarne ter načrtovanje dela na delovnih mestih (Wiendahl et al. 2015, Bracht et al. 2018, Burggräf et al. 2021). Razpoložljiva programska oprema ponuja iz leta v leto vedno več funkcionalnosti, kot je na primer integrirano tovarniško modeliranje (Integrated Factory Modeling - IFM), ki ponuja prednost dostopa do podrobnejših informacij v primerjavi s čisto 3D vizualizacijo (Burggräf et al. 2021). Vendar pa se večinoma uporabljajo različna orodja za načrtovanje tovarn/logistike in za podrobno načrtovanje delovnih sistemov v smislu delovnih mest (Bracht et al., 2018). Orodja se med seboj razlikujejo tako po naboru funkcionalnosti kot tudi po načinu rokovanja z njimi. Skupna baza podatkov za obe vrsti orodij ni na voljo, zato je za prenos podatkov potrebna pretvorba podatkov v zahtevani format zapisa. To je dolgotrajen postopek in lahko povzroči napake v podatkih ali njihovo izgubo.

Zaganjanje dveh ali več različnih programskih orodij od podjetja zahteva velike finančne vložke in strokovnjake, ki obvladajo delo z več programskimi orodji. Izobraževanje in usposabljanje strokovnjakov je drago in zahteva svoj čas. Vsa

programska orodja ne nudijo vmesnikov za povezovanje z drugimi programskimi orodji, kar se posledično odrazi v ločenem načrtovanju tovarne in delovnega mesta. Posledica je lahko zamudno in drago ponavljanje načrtovanja, ker se nekaj, kar je bilo optimalno z uporabo prvega programskega orodja za načrtovanje tovarne izkaže za neoptimalno z uporabo drugega programskega orodja za načrtovanje delovnega mesta. Za načrtovanje in oblikovanje tovarn in delovnih sistemov je tako smiselno in racionalno uporabiti eno programsko orodje in celosten pristop, ki upošteva tako raven načrtovanja tovarne kot raven načrtovanja delovnega mesta, da bi znižali stroške načrtovanja, izboljšali kakovost rezultatov in zmanjšali potreben napor pri načrtovanju. V nadaljevanju je predstavljen iterativni pristop k neprekinjenemu digitalnemu načrtovanju med nivojema tovarne in delovnega mesta z uporabo palete programskih orodij EMA.

3.2 Digitalna tovarna in načrtovanje dela za ekonomično in ergonomsko oblikovanje proizvodnje

Na primeru projekta načrtovanja proizvodnje in montaže pralnega stroja je opisan postopek iterativnega, kombiniranega načrtovanja tovarne in dela z uporabo EMA Software Suite (Spitzhirn et al., 2022). Cilja sta preoblikovanje montažne linije in optimizacija proizvodne linije. Preveriti je treba tudi, ali je načrtovani proizvodni program mogoče realizirati z obstoječimi stroji in kapaciteto montaže ter, kako bi ob dobrih ergonomskih pogojih za delavce na posameznih delovnih mestih dosegli izboljšanje ekonomske učinkovitosti celotne proizvodnje.

Glede na proizvodni program in asortima se določijo ciljne količine, plansko obdobje ter zahteve po kakovosti in količini proizvodnje. Potrebno je preučiti tudi izdelek, saj njegove posamezne komponente določajo proizvodne postopke, tehnologijo rokovanja itd., struktura izdelka pa tudi zaporedje sestavljanja. Spremembe na izdelku, kot je poenostavitev ali združitev funkcionalnih enot, lahko vplivajo na tehnične, ekonomske in ergonomske pogoje (npr. masa, sile, način prijemanja) proizvodnje (Schenk et al., 2014; Bracht et al., 2018).

Pralni stroj je sestavljen iz 86 sestavnih delov, vključno z okvirjem pralnega stroja, bobnom pralnega stroja, odtočno črpalko, različnimi vodniki, cevmi in vijaki. Sestavni deli se razlikujejo po obliki, dimenzijah in masi. Skupna masa pralnega stroja znaša 82,95 kg, mase sestavnih delov pa znašajo od nekaj gramov do več kot 10 kg. Pralni stroj je izdelan v treh barvnih različicah (bela, modra, oranžna).

Cilje in funkcije programske opreme EMA lahko prikažemo z orodjema EMA Plant Designer (emaPD) in EMA Work Designer (emaWD). Sistema emaPD in emaWD lahko uporabljamo samostojno ali skupaj v enem vmesniku. Načrtovanje proizvodnje in montaže na ravni tovarne se izvaja v emaPD (makro raven načrtovanja). Natančna 3D vizualizacija in načrtovanje proizvodnih linij do ravni delovnega mesta v skladu z ekonomskimi, časovnimi in ergonomske kriteriji pa se izvajajo v emaWD (mikro raven načrtovanja). Nastajajoče načrte je mogoče izmenjevati neposredno in sinhrono preko dvosmernega vmesnika med emaPD in emaWD.

Računalniško podprto modeliranje, analiza in optimizacija proizvodnje se izvajajo v emaPD na podlagi matematično-analitičnih računskih metod (npr. teorije čakalnih vrst (Manitz, 2008)) upoštevajoč pretočne čase, prostorske zahteve in stroške izdelave. Potrebni vhodni podatki so podatki o izdelkih (načrtovane količine, seznam sestavnih delov, velikosti serij), podatki o procesu (tehnološki postopki, podatki o pakirnih enotah) in podatki o virih (razpoložljivost, stroški, površine, število izmen).

Najprej je treba ugotoviti, ali je proizvodni program (cilj: 80.000 pralnih strojev letno) mogoče realizirati pod obstoječimi pogoji (npr. število in vrste strojev). Ugotoviti je mogoče morebitna ozka grla, prostorske zahteve ali kritično pot proizvodnje, tako da je mogoče izpeljati ukrepe za izboljšanje (npr. dodajanje strojev, vmesnih prostorov, izmen itd.).

Nadalje je treba sprejeti odločitve o razmerju med lastno proizvodnjo in zunanjimi izvajalci, o vrsti strojev in opremi ter opredeliti delovni proces na makro nivoju podrobnosti. Za tovarno/proizvodnjo je mogoče kreirati alternativne stroje in tehnološke postopke ter simulirati različne scenarije proizvodnje ob upoštevanju stroškov, razpoložljivosti virov, razpoložljivega prostora in izdelovalnih časov. Da bi se raziskalo morebitne težave za delavce glede prostora, ergonomije in časovnih zahtev, se rezultati načrtovanja iz emaPD izvozijo v emaWD. Interakcijo med človekom, ki ga ponazarja digitalni model človeka z možnostjo izbiranja različnih lastnosti in delovnim mestom, je mogoče analizirati v emaWD. V primeru neugodnih rezultatov je mogoče delovno mesto ali postopek dela prilagoditi glede na ergonomske in ekonomske zahteve.

Z izračunom celotne učinkovitosti opreme (OEE) v emaPD je mogoče določiti produktivnost in morebitne izgube v povezavi z uporabo strojev. Stroške materiala in izdelave je mogoče izračunati prav tako v emaPD ob upoštevanju stroškov skladiščenja materiala, strojev (urne postavke ali fiksni/variabilni stroški) ter kupljenih delov in materialov. V kombinaciji z emaWD se lahko za delovna sredstva v izračun vključijo investicijski stroški, ki posledično vplivajo na stroške proizvodnje. V emaWD je mogoče čase izdelave in montaže določiti z meritvijo ali z uporabo standardne časovne metode MTM-UAS.

Raven celotne proizvodnje v emaPD upošteva izkoriščenost vseh strojev in prostora v tovarni in ne zgolj za posamezno delovno mesto. Nastaviti je mogoče različne razporeditve delovnih mest in variante tehnoloških postopkov ter oceniti različne plane proizvodnje in jih primerjati skozi ključne pokazatelje delovanja (Key Performance Indicators – KPI), kot so na primer potreba po prostoru, obseg proizvodnje in stroški. Natančno načrtovanje umestitve delovnih mest v prostor in strojev znotraj delovnih mest se da določiti v emaWD in izvoziti v emaPD. To omogoča optimizacijo pretoka materiala glede na intenzivnost transporta in potreben napor. Poleg tega bi lahko v proces načrtovanja vključili tudi fizično obremenitev ljudi. Za ustvarjanje in oblikovanje postavitve v 3D je mogoče standardne stroje in delovna mesta definirati v emaPD in jih samodejno uvoziti v emaWD.

Podrobno načrtovanje in oblikovanje delovnih mest se izvaja v emaWD z uporabo antropometričnih človeških modelov; od majhnih žensk do velikih moških z različnimi sposobnostmi (od starosti odvisna prožnost in moč) za načrtovanje ekonomičnih, ergonomskih in na sposobnostih temelječih delovnih procesov (Ullmann & Fritzsche, 2021). Konfigurator človeškega modela omogoča uporabniku dodajanje modelov v 3D-okolje.

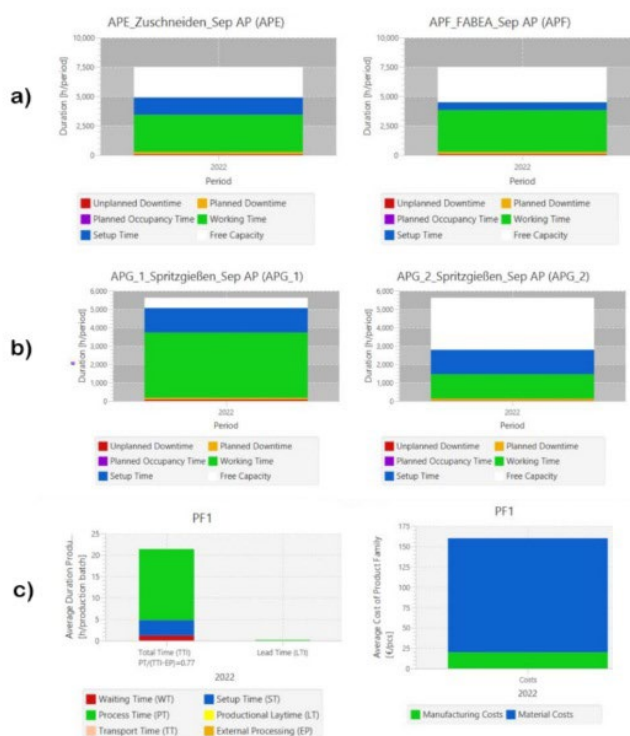
Načrtovanje ročnih in delno avtomatiziranih procesov ter interakcij človek-robot je možno s pomočjo simulacije procesa v emaWD. Za določitev delovnih procesov se pot in gibanje digitalnega človeškega modela samodejno generirata na podlagi parametriziranega opisa dejavnosti (uporaba knjižnice nalog v ema simulacijskem okolju) s specifikacijo osnovnih delovnih pogojev (npr. predmeti, s katerimi je treba ravnati, ciljni položaji itd.).

Uporabnik simulacijskega orodja lahko uporablja veliko različnih in dobro znanih metod analize, kot so standardni čas izvajanja po MTM-UAS (Bokranz & Landau, 2012), prehojena razdalja, delež aktivnosti z dodano vrednostjo, ocena tveganja za zdravje po EAWS (Ergonomic Assessment Worksheet) (Schaub et al., 2012) in indeks dviga po NIOSH (Waters et al. 1994). Vse te analize znotraj emaWD služijo prepoznavanju ekonomskih in ergonomskih težav (Fritzsche et al., 2019b; Spitzhirn et al. 2022). Izboljšave je mogoče doseči s spremembami v delovnem okolju (npr. višina mize), s prenosom zdravju škodljivih dejavnosti s človeka na robota ali s premikanjem delovnih nalog med delovnimi mesti. Končni scenarij je dokumentiran v programskem paketu EMA z uporabo poročil, slik, videoposnetkov in simulacije proizvodnega postopka.

3.3 Rezultati digitalnega iterativnega načrtovanja proizvodnje z uporabo digitalnega načrtovanja tovarne in dela

Predvidena je proizvodnja 80.000 pralnih strojev v treh barvnih različicah (bela: 55.000, modra: 15.000, oranžna: 10.000). Slika 6.1 prikazuje primere rezultatov v emaPD za proizvodnjo pralnih strojev.

Upoštevajoč razpoložljivost strojev ter stroške dostave, čas in razpoložljivost, je 23 sestavnih delov proizvedenih v podjetju, 63 sestavnih delov pa je kupljenih. Simulacija trenutnega stanja proizvodnje je pokazala, da proizvodnja ni zmožna izdelati vseh naročenih kosov. Primanjkljaj je znašal 7.587 enot. S povečanjem števila strojev za razrez iz 2 na 3, prilagajanjem in usklajevanjem velikosti serij ter optimizacijo izvedbenih časov (skrajšanje čakalnih dob, preusmeritev naročil na manj zasedene stroje) je bilo mogoče doseči zahtevani obseg proizvodnje. Na montažni liniji, ki jo tvori 8 povezanih delovnih postaj s skupno 14 zaposlenimi, so se časi blokiranja pri postaji APB zmanjšali iz 348 ur na 180 ur in pri postaji AP1 iz 133 ur na 60 ur. Zmanjšal pa se je tudi čas nedejavnosti na AP1 iz 86 ur na 0 ur z vzpostavitvijo petih vmesnih zalogovnikov med APB in AP1 in osmih vmesnih zalogovnikov med AP1 in AP2. Površina, namenjena proizvodnji, meri 530,06 m² in povzroča proizvodne stroške v znesku 159,98 €. Izkoriščenost posameznih delovnih mest variira med 98,6 % za montažno linijo in 48,6 % za stroj za brizganje tipa A.



Slika 6.1: Primeri rezultatov v emaPD za proizvodnjo pralnih strojev

Vir: lasten vir

Po izvedenem grobem načrtovanju sta bili postavitve proizvodnje in montažna linija preneseni iz emaPD v emaWD. V emaWD je bil nadalje urejen materialni tok, vključno z omrežjem poti (glej sliko 6.6 levo) in simulirana postavitve (glej sliko 6.6 desno). Dodani so bili novi objekti, kot so tekoči trakovi, police in škatle ter potrebni vhodni podatki (uteži, mase, natančne koordinate postavitve) za potrebe ergonomske in časovne ocene.

Analiza trenutnih montažnih delovnih mest z uporabo povprečnega moškega digitalnega človeškega modela je pokazala, da obstajajo 4 rdeča delovna mesta, 7 rumenih delovnih mest in 3 zelena delovna mesta po EAWS ergonomski oceni. Rdeča in rumena barva delovnega mesta pomenita povečano tveganje za obolenja kostno-mišičnega sistema. Poleg tega je bila opravljena ergonomska ocena dela glede na starost zaposlenega. V ta namen so bili v simulacijski model dodani dodatni

človeški modeli: (1) majhna, starejša ženska (starostna skupina: 60 let; 154 cm, starosti primerno zmanjšana zmožnost gibanja), (2) visok mladenič (starostna skupina: 20 let, 194 cm, starosti primeren obseg gibanja in moči) in (3) visok, starejši moški (starostna skupina: 60 let, 183,5 cm, starosti primerno zmanjšana zmožnost gibanja in moč). Preizkus izvedljivosti je pokazal, da lahko srednje velik moški, visok mlajši moški in visok starejši moški izvajajo vse dejavnosti načrtovane proizvodnje. Nadalje, ženska nižje rasti ne more doseči vseh lokacij, ki so potrebne za delo na tekočem traku za izdelavo pralnega stroja. Slika 7 prikazuje povzetek del, ki jih starejša ženska nižje rasti ne more izvajati. Na primer, ženska okrog 60 let zelo verjetno ne bo zmogla potisniti bobna pralnega stroja v okvir (delovno mesto 1R). To vpliva tudi na delovno mesto 1L, saj delavca na delovnih mestih 1R in 1L skupaj pritrjujeta boben.

Različne lastnosti ljudi (različna antropometrija, gibljivost, maksimalna moč) vplivajo tudi na oceno obremenitve in rezultat biomehanskega tveganja po EAWS. Tabela 1 kaže, da je fizična obremenitev po EAWS na delovnih mestih 1R, 2R in 4L višja pri starejši ženski v 60-ih letih nižje rasti kot pri moškemu srednjih let in starejšemu moškemu v 60-ih letih. Poleg tega je izvedljivost dela, kot je prikazano na sliki 7 in v tabeli 1, omejena ali neizvedljiva za delovna mesta 1R in 4L zaradi nižje telesne rasti in zmanjšane gibljivosti zaradi starosti (Spitzhirm, 2017).

Za izboljšanje ergonomskih in ekonomskih rezultatov so se v simulacijski model vnesle nekatere korekcije oziroma izboljšave. Ukrepi so bili kasneje simulirani v emaWD in ovrednoteni z uporabo EAWS in MTM-UAS. Ukrepi so bili naslednji:

- robot Fanuc CR35ia, ki dvigne mase do 35 kg (masa pralnega bobna = 30,7 kg), je bil uveden na delovno mesto 1R (upravljanje s pralnim bobnom (EAWS: zmanjšanje iz 61,5 na 23 točk)).
- Robot UR10e je bil uveden na delovno mesto 2R (prevzem zadnje stene (EAWS: zmanjšanje iz 52,5 na 32 točk)).
- Uvedba podstavka na delovnem mestu 4L (EAWS: zmanjšanje iz 59 na 31,5 točk) in na delovnem mestu 5L (EAWS: zmanjšanje iz 40,5 na 40,0 točk).
- Prestavitev delovne operacije sestav releja iz delovnega mesta 3L na delovno mesto 7R (EAWS: zmanjšanje iz 55,5 na 42 točk) za izboljšanje ergonomskih pogojev in uravnoteženje linije.

Tabela 1: Povzetek rezultatov ergonomskega testa na podlagi testa izvedljivosti in EAWS za delovna mesta 1R, 2R,4L

	Delovno mesto 1R			Delovno mesto 2R			Delovno mesto 4L		
	M50- AK40	F05- AK60	M95- AK60	M50- AK40	F05- AK60	M95- AK60	M50- AK40	F05- AK60	M95- AK60
Izvedljivost	DA	NE	DA	DA	DA	DA	DA	NE	DA
= EAWS točke ¹	61,5	(70,0) ²	68,5	52,5	56,5	52,5	59	(63) ²	37
+ točke zaradi položaja udov	6	(5,5)	7,5	2	2	2	24	(28)	2
+ točke zaradi sil	50	(59)	56	34	34	34	33	(33)	33
+ točke zaradi dela z bremenimi	-	(-)	-	16,5	20,5	16,5	-	(-)	-
+ Dodatne točke	5,5	(5,5)	5,5	-	-	-	2	(2)	2

¹ Legenda: EAWS (visoko tveganje za zdravje > 50 točk, možno tveganje za zdravje > 25 točk, nizko tveganje za zdravje ≤ 25 točk)

² ni izvedljivo glede na preverjanje izvedljivosti z emaWD

Vir: Prirejeno po Spitzhirn et al., 2022

Po prenovi se je čas cikla glede na MTM-UAS zmanjšal iz 70 s na 60 s, delovna mesta pa so bila ponovno časovno uravnotežena s prestavitvijo delovne operacije iz enega delovnega mesta na drugo. Slika 8 prikazuje rezultate optimizacije za štiri predhodno rdeča delovna mesta 1R, 2R, 3L, 4L v primerjavi z začetnim stanjem po EAWS.

Podatki o optimiziranem modelu so bili preneseni iz emaWD nazaj v emaPD. Zaradi izvedenega uravnoteženja delovnih mest in drugih izboljšav je bilo mogoče občutno zmanjšati kapaciteto vmesnih zalogovnikov. Obdržati je bilo potrebno samo vmesni zalogovnik med delovnima mestoma APB in AP1. Čas mirovanja in zastoja na tekočem traku se je skrajšal na manj kot 50 ur, proizvodni stroški pa so se zmanjšali za skoraj 10 % ob hkratnem povečanju proizvodnje.

4 Zaključek

Poglavje Načrtovanje hibridnih delovnih mest človek-stroj definira osnovne pojme, potrebne za razumevanje obravnavane tematike, ki je v današnjem času intenzivne digitalizacije, prehajanja v I4.0 in prizadevanja za trajnostno delovanje izjemno aktualna. Zaposleni postajajo Operaterji 4.0. Industrija se ne sooča samo z novo tehnološko revolucijo, ampak tudi s povsem novimi delovnimi pogoji za ljudi in zahtevami glede njihovih kompetenc, spretnosti in znanj. Kot je bilo prikazano, je pri nadgradnji ročnih delovnih mest v delovna mesta človek-stroj napačno slediti

samo vidiku tehnologije, ampak je potrebno misliti tudi na tveganja za dobro počutje in zdravje zaposlenih. Na tak način bo prehod v I4.0 potekal ob manjšem nasprotovanju zaposlenih in se bo odrazil v trajnostnih pozitivnih učinkih za zaposlene in podjetja.

Uporabljene metode za ocenitev ekonomske in ergonomske vrednosti delovnega mesta niso nekaj novega. Nov je samo način njihovega izvajanja. Če so se do nedavnega izvajale ročno, s svinčnikom na papir, to danes ni več tako. Na voljo so nam elektronska orodja, ki so preverjena. Rezultati ocenitve z elektronskimi orodji so povsem primerljivi tistim, izvedenim na papirju. Primer uporabe takšnega orodja, Ema Suite, smo prikazali v poglavju 3 in ob tem omenili tudi metodi za izvedbo ergonomske ocene tveganja EAWS in NIOSH ter metodo za študij porabe časa MTM-UAS.

Celostno načrtovanje hibridnih delovnih mest človek-stroj zahteva obsežno predznanje novih tehnologij, logistike, procesnega pristopa, ergonomije dela, študije časa, vitkosti, trajnosti in digitalizacije. Upamo, da nam je s prispevkom uspelo prikazati potrebo po multi- in inter-disciplinarni obravnavi načrtovanja hibridnih delovnih mest človek-stroj. Vendar pa naj to ne vpliva na odvrčanje od tovrstnih projektov v praksi, ampak zaradi velikosti izziva in pozitivnih učinkov za zaposlene in podjetja spodbuja k hitrejšemu uvajanju hibridnih delovnih mest človek-stroj v industrijska okolja današnjega časa.

Literatura in viri

- Adriaensen, A., Decré, W., in Pintelon, L. (2019). Can complexity-thinking methods contribute to improving occupational safety in industry 4.0? A review of safety analysis methods and their concepts. *Safety* 5:4. doi: 10.3390/safety5040065
- Agnusdei, G., Elia, V., in Gnoni, M. (2021). Is digital twin technology supporting safety management? A bibliometric and systematic review. *Appl. Sci.* 11:2767. doi: 10.3390/app11062767
- Badri, A., Boudreau-Trudel, B., in Souissi, A. S. (2018). Occupational health and safety in the industry 4.0 era: a cause for major concern? *Saf. Sci.* 109, 403–411. doi: 10.1016/j.ssci.2018.06.012
- Barcellini, F. (2019). "Industrie du futur: quelle place pour le travail et ses transformations," in *Le Travail en mouvement*, eds E. Bourdu, M. Lallement, P. Veltz, and T. Weil (Cerisy: Presses des Mines).
- Barcellini, F., Buchmann, W., Béarée, R., Benchekroun, T.-H., Bounouar, M., Dubey, G., et al. (2021). "Collaborative robotics and industry 4.0: an engineering, sociology and activity-centered ergonomics cross-experience," in *Proceedings of the 21st Congress of the International Ergonomics Association (IEA 2021)*, eds N. Black, P. Neumann, and I. Noy (Springer). doi: 10.1007/978-3-030-74614-8_74

- Barcellini, F., Van Belleghem, L., in Daniellou, F. (2015). "Design projects as opportunities for the development of activities," in *Constructive Ergonomics*, ed P. Falzon (New York, NY: Taylor and Francis).
- Beer, P., in Mulder, R. H. (2020). The effects of technological developments on work and their implications for continuous vocational education and training: a systematic review. *Front. Psychol.* 11:918. doi: 10.3389/fpsyg.2020.00918
- Béguin, P., in Cerf, M. (2004). Formes et enjeux de l'analyse de l'activité pour la conception des systèmes de travail. *Activités* 1, 54–71. doi: 10.4000/activites.1156
- Bentley, T., Green, N., Tappin, D., in Haslam, R. (2021). State of science: the future of work – ergonomics and human factors contributions to the field. *Ergonomics* 64, 427–439. doi: 10.1080/00140139.2020.1841308
- Blštáková, J., Joniaková, Z., Jankelová, N., Stachová, K., in Stacho, Z. (2020). Reflection of digitalization on business values: the results of examining values of people management in a digital age. *Sustainability* 12:5202. doi: 10.3390/su12125202
- Bobillier Chaumon, M.-E. (2021). "Emerging technologies and issues for activity and occupational health," in *Digital Transformations in the Challenge of Activity and Work: Understanding and Supporting Technological Changes*, ed M.-E. Bobillier Chaumon (London: ISTE and John Wiley & Sons). doi: 10.1002/9781119808343.ch1
- Bobillier Chaumon, M.-E., Barville, N., in Crouzat, P. (2019). Innovations technologiques de rupture: quels champs de réflexion et d'intervention pour le psychologue du travail et des organisations? *Le J. Psychol.* 367, 16–21. doi: 10.3917/jdp.367.0016
- Bounouar, M., Bearee, R., Siadat, A., in Benchekroun, T.-H. (2022). On the role of human operators in the design process of cobotic systems. *Cogn. Tech.Work.* 24, 57–73. doi: 10.1007/s10111-021-00691-y
- Bracht, U., Geckler, D., in Wenzel, S. (2018). *Digitale Fabrik – Methoden und Praxisbeispiele*. Springer Berlin Heidelberg.
- Brodav, E. E. (2020). Participatory ergonomics in the context of industry 4.0: a literature review. *Theor. Issues Ergon. Sci.* 22, 237–250. doi: 10.1080/1463922X.2020.1801886
- Brozzi, R., Forti, D., Rauch, E., in Matt, D. T. (2020). The advantages of industry 4.0 applications for sustainability: results from a sample of manufacturing companies. *Sustainability* 12:9. doi: 10.3390/su12093647
- Burggräf, P., Dannapfel, M., Hahn, V. et al. Uncovering the human evaluation of changeability for automated factory layout planning: an expert survey. *Prod. Eng. Res. Dev.* 15, 285–298 (2021). <https://doi.org/10.1007/s11740-020-01015-1>
- Cimini, C., Lagorio, A., Pirola, F., in Pinto, R. (2020). How human factors affect operators' task evolution in logistics 4.0. *Hum. Factors Ergon. Manuf.* 31, 98–117. doi: 10.1002/hfm.20872
- Çinar, Z. M., Zeeshan, Q., in Korhan, O. (2021). A framework for industry 4.0 readiness and maturity of smart manufacturing enterprises: a case study. *Sustainability* 13:12. doi: 10.3390/su13126659
- Cockburn, W. (2021). OSH in the future: where next? *Eur. J. Work. Innov.* 6, 84–97. doi: 10.46364/ejwi.v6i1.813
- Costantino, F., Falegnami, A., Fedele, L., Bernabei, M., Stabile, S., in Bentivenga, R. (2021). New and emerging hazards for health and safety within digitalized manufacturing systems. *Sustainability* 13:19. doi: 10.3390/su131910948
- Coutarel, F., Aublet-Cuvelier, A., Caroly, S., Vézina, N., Roquelaure, Y., Cuny-Guerrier, A., et al. (2022). Operational leeway and the prevention of musculoskeletal disorders: what are the prospects? *Trav. Hum.* 85, 3–31. doi: 10.3917/th.851.0003
- Cunha, L., Silva, D. in Maggioli, S. (2022). Exploring the status of the human operator in Industry 4.0: A systematic review. *Front. Psychol.* 13:889129. doi: 10.3389/fpsyg.2022.889129
- Cunha, L., Silva, D., Santos, M., in Pereira, C. (2020). Do we want to keep working in 12-hour shifts? The follow-up of the work schedule change in a Portuguese industrial company. *Int. J. Ind. Ergon.* 77:102958. doi: 10.1016/j.ergon.2020.102958

- Engeström, Y. (1999). "Innovative learning in work teams: analysing cycles of knowledge creation in practice," in *Perspectives on Activity Theory*, eds Y. Engeström, R. Miettinen, and R. Punamaki (Cambridge: Cambridge University Press). doi: 10.1017/CBO9780511812774.025
- EU-OSHA (2018). *Foresight on New and Emerging Occupational Safety and Health Risks Associated Digitalisation by 2025*. Luxembourg: Publications Office of the European Union.
- Fantini, P., Pinzone, M., in Taisch, M. (2020). Placing the operator at the centre of Industry 4.0 design: Modelling and assessing human activities within cyber-physical systems. *Comp. Ind. Eng.* 139:105058. doi: 10.1016/j.cie.2018.01.025
- Frey, C., in Osborne, M. (2017). The future of employment: how susceptible are jobs to computerisation? *Tech. Forecast. Soc. Change.* 114, 254–280. doi: 10.1016/j.techfore.2016.08.019
- Fritzsche, L., Ullmann, S., Bauer, S. in Sylaja, V. J. (2019b). Task-based digital human simulation with Editor for Manual Work Activities – Industrial applications in product design and production planning. In G. Paul & S. Scataglini (Eds.), *DHM and Posturography*. London, UK: Elsevier. 569-575.
- Gajšek, B., Stradovnik, S., in Hace, A. (2020). Sustainable move towards flexible, robotic, human-involving workplace. *Sustainability* 12:16. doi: 10.3390/su12166590
- Galey, L., Audignon, S., Witschger, O., Bau, S., Judon, N., Lacour, A., et al. (2020). What does ergonomics have to do with nanotechnologies? A case study. *Appl. Ergon.* 87:103116. doi: 10.1016/j.apergo.2020.103116
- Gaudart, C. (2016). Activity, time and itineraries: for the integration of multiple times in the ergonomic analysis of work. *Trav. Hum.* 79, 209–232. doi: 10.3917/th.793.0209
- Gazzaneo, L., Padovano, A., in Umbrello, S. (2020). Designing smart operator 4.0 for human values: a value sensitive design approach. *Proc. Manuf.* 42, 219–226. doi: 10.1016/j.promfg.2020.02.073
- Ghislieri, C., Molino, M., in Cortese, C. (2018). Work and organizational psychology looks at the fourth industrial revolution: how to support workers and organizations. *Front. Psychol.* 9:2365. doi: 10.3389/fpsyg.2018.02365
- Golsch, K., in Seegers, M. (2021). Perceptions of technological change at work through a gender lens. *Gend. Vyzk. Gend.* 21, 32–58. doi: 10.13060/gav.2020.013
- Gualtieri, L., Palomba, I., Merati, F. A., Rauch, E., in Vidoni, R. (2020). Design of human-centered collaborative assembly workstations for the improvement of operators' physical ergonomics and production efficiency: a case study. *Sustainability* 12:9. doi: 10.3390/su12093606
- Hoyer, C., Gunawan, I., and Reaiche, C. H. (2020). The implementation of industry 4.0 - a systematic literature review of the key factors. *Syst. Res. Behav. Sci.* 37, 557–578. doi: 10.1002/sres.2701
- Iordache, O. (2017). "Industrial systems," in *Implementing Polytope Projects for Smart Systems*, ed O. Iordache (Springer). doi: 10.1007/978-3-319-52551-8_8
- Ivaldi, S., Scaratti, G., in Fregnan, E. (2021). Dwelling within the fourth industrial revolution: organizational learning for new competences, processes and work cultures. *J. Workplace Learn.* 34, 1–26. doi: 10.1108/JWL-07-2020-0127
- Kaasinen, E., Schmalfuß, F., Özturk, C., Aromaa, S., Boubekeur, M., Heilala, J., et al. (2020). Empowering and engaging industrial workers with Operator 4.0 solutions. *Comput. Ind. Eng.* 139:105678. doi: 10.1016/j.cie.2019.01.052
- Kadir, B. A., in Broberg, O. (2020). Human well-being and system performance in the transition to industry 4.0. *Int. J. Ind. Ergon.* 76:e102936. doi: 10.1016/j.ergon.2020.102936
- Kadir, B. A., in Broberg, O. (2020). Human well-being and system performance in the transition to industry 4.0. *Int. J. Ind. Ergon.* 76:e102936. doi: 10.1016/j.ergon.2020.102936
- Kadir, B. A., in Broberg, O. (2021). Human-centered design of work systems in the transition to industry 4.0. *Appl. Ergon.* 92:e103334. doi: 10.1016/j.apergo.2020.103334
- Leso, V., Fontana, L., in Iavicoli, I. (2018). The occupational health and safety dimension of Industry 4.0. *Med. Lav.* 109, 327–338. doi: 10.23749/mdl.v110i5.7282

- Li, L. (2022). Reskilling and upskilling the future-ready workforce for industry 4.0 and beyond. *Inf. Syst. Front.* 13:1–16. doi: 10.1007/s10796-022-10308-y
- Longo, F., Padovano, A., in Umbrello, S. (2020). Value-oriented and ethical technology engineering in industry 5.0: a human-centric perspective for the design of the factory of the future. *Appl. Sci.* 10, 1–25. doi: 10.3390/app10124182
- Manitz, M. (2008). Queueing-model based analysis of assembly lines with finite buffers and general service times. *Computers & Operations Research* 35, 2520 – 2536.
- Mark, B. G., Hofmayer, S., Rauch, E., in Matt, D. T. (2019). Inclusion of workers with disabilities in production 4.0: legal foundations in Europe and potentials through worker assistance systems. *Sustainability* 11:21. doi: 10.3390/su11215978
- Marrella, A., in Mecella, M. (2017). Adaptive process management in cyber-physical domains. *Intell. Syst. Ref. Libr.* 123:e52181. doi: 10.1007/978-3-319-52181-7_2
- Messing, K., in Silverstein, B. A. (2009). Gender and occupational health. *Scand. J. Work Environ. Health.* 35, 81–83. doi: 10.5271/sjweh.1314
- Moniz, A., in Krings, B.-J. (2016). Robots working with humans or humans working with robots? Searching for social dimensions in new human-robot interaction in industry. *Societies* 6:23. doi: 10.3390/soc6030023
- Moro, A., Rinaldini, M., Staccioli, J., in Virgillito, M. E. (2019). Control in the era of surveillance capitalism. An empirical investigation of Italian Industry 4.0 factories. *J. Ind. Bus. Econ.* 46, 347–360. doi: 10.1007/s40812-019-00120-2
- Moro, A., Rinaldini, M., Staccioli, J., in Virgillito, M. E. (2019). Control in the era of surveillance capitalism. An empirical investigation of Italian Industry 4.0 factories. *J. Ind. Bus. Econ.* 46, 347–360. doi: 10.1007/s40812-019-00120-2
- Neumann, W., Winkelhaus, S., Grosse, E., in Glock, C. (2021). Industry 4.0 and the human factor – A systems framework and analysis methodology for successful development. *Int. J. Prod. Econ.* 233:107922. doi: 10.1016/j.ijpe.2020.107992
- Pacaux-Lemoine, M.-P., Sallak, M., Sacile, R., Flemisch, F., in Leitão, P. (2022). Introduction to the special section humans and industry 4.0. *Cogn. Tech. Work.* 24, 1–5. doi: 10.1007/s10111-022-00696-1
- Paliga, M., in Pollak, A. (2021). Development and validation of the fluency in human-robot interaction scale. A two-wave study on three perspectives of fluency. *Int. J. Hum. Comput. Stud.* 155:e102698. doi: 10.1016/j.ijhcs.2021.102698
- Patriarca, R., Falegnami, A., Costantino, F., di Gravio, G., De Nicola, A., in Villani, M. L. (2021). WAX: An integrated conceptual framework for the analysis of cyber-socio-technical systems. *Saf. Sci.* 136:e105142. doi: 10.1016/j.ssci.2020.105142
- Piasna, A., in Drahoukoupil, J. (2017). Gender inequalities in the new world of work. *Transfer* 23, 313–332. doi: 10.1177/1024258917713839
- Ranavolo, A., Draicchio, F., Silvetti, A., Varrecchia, T., Helen Rosen, P., Wischniewski, S., et al. (2021). “Human-Robot collaboration (HRC) technologies for reducing Work-related Musculoskeletal Diseases in industry 4.0,” in IEA2021: 21st triennial congress of the international ergonomics association. in *Proceedings of the 21st Congress of the International Ergonomics Association (IEA 2021)*. IEA 2021. Lecture Notes in Networks and Systems, eds N. Black, P. Neumann, and I. Noy (Springer), 335–342. doi: 10.1007/978-3-030-74614-8_40
- Rangraz, M., in Pareto, L. (2021). Workplace work-integrated learning: supporting industry 4.0 transformation for small manufacturing plants by reskilling staff. *Int. J. Lifelong Educ.* 40:1, 5–22. doi: 10.1080/02601370.2020.1867249
- Reiman, A., Kaivo-oja, J., Parviainen, E., Takala, E. P., in Lauraeus, T. (2021). Human factors and ergonomics in manufacturing in the industry 4.0 context – a scoping review. *Technol. Soc.* 65:e101572. doi: 10.1016/j.techsoc.2021.101572
- Romero, D., Bernus, P., Noran, O., Stahre, J., in Fast-Berglund, S. (2016a). “The operator 4.0: human cyber-physical systems and adaptive automation towards human-automation symbiosis work

- systems,” in IFIP Advances in Information and Communication Technology. 677–686. doi: 10.1007/978-3-319-51133-7_80
- Romero, D., Noran, O., Stahre, J., Bernus, P., in Fast-Berglund, Å. (2016b). “Towards a human-centred reference architecture for next generation balanced automation systems: human-automation symbiosis,” in Advances in Production Management Systems: Innovative Production Management Towards Sustainable Growth, eds S. Umeda et al. (Springer). doi: 10.1007/978-3-319-22759-7_64
- Ruppert, T., Jaskó, S., Holzinger, T., in Abonyi, J. (2018). Enabling technologies for operator 4.0: a survey. *Appl. Sci.* 8:1650. doi: 10.3390/app8091650
- Saabye, H., Kristensen, T. B., in Wæhrens, B. V. (2020). Real-time data utilization barriers to improving production performance: an in-depth case study linking lean management and industry 4.0 from a learning organization perspective. *Sustainability* 12, 1–21. doi: 10.3390/su12218757
- Saraceno, M. (2020). L’homme «au coeur»: du robot au cobot, le mythe du « automate dans la médiatisation de «industrie du futur» (1978-2018). *Communication* 37:e11293. doi: 10.4000/communication.11293
- Schaub, K.G., Mühlstedt, J., Illmann, B., Bauer, S., Fritzsche, L., Wagner, T., Bullinger-Hoffmann, A.C., in Bruder, R. (2012). Ergonomic assessment of automotive assembly tasks with digital human modelling and the ‘ergonomics assessment worksheet’ (EAWS). *Int. J. Human Factors Modelling and Simulation*, Vol. 3, Nos. 3/4, 398-426.
- Schenk M., Wirth, S., in Müller, E. (2014). *Fabrikplanung und Fabrikbetrieb. Methoden für die wandlungsfähige, vernetzte und ressourceneffiziente Fabrik.* Berlin, Heidelberg: Vieweg.
- Schlick, C., Bruder, R., in Luczak, H. (2018). *Arbeitswissenschaft.* Heidelberg: Springer-Verlag.
- Shi, H., Yang, M., in Jiang, P. (2021). Social production system: a three-layer smart framework for implementing autonomous human-machine collaborations in a shop floor. *IEEE Access* 9, 26696–26711. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3050236
- Sony, M., in Naik, S. (2020). Industry 4.0 integration with socio-technical systems theory: a systematic review and proposed theoretical model. *Technol. Soc.* 61:e101248. doi: 10.1016/j.techsoc.2020.101248
- Spath, D., Westkämper, E., Bullinger, H.J., in Warnecke, H.J. (2017). *Neue Entwicklungen in der Unternehmensorganisation.* Berlin, Heidelberg: Vieweg (VDI-Buch Serie)
- Spitzhirn, M., Ullmann, S., Bauer, S., in Fritzsche, L. (2022, August). Digital production planning and human simulation of manual and hybrid work processes using the ema Software Suite. In *Proceedings of the 7th International Digital Human Modeling Symposium (Vol. 7, No. 1).* University of Iowa.
- Spitzhirn, M., Ullmann, S., Fritzsche L. (2022). Human-centered design of industrial work tasks with ema software – Considering individual abilities and age-related changes in digital production planning. In: *Z. Arb. Wiss.* Vol. 76. Issue 4, Dec. 2022 (accepted).
- Stern, H., in Becker, T. (2019). Concept and evaluation of a method for the integration of human factors into human-oriented work design in cyber-physical production systems. *Sustainability* 11:16. doi: 10.3390/su11164508
- Teiger, C., in Lacomblez, M. (2013). “Quand une dynamique nouvelle se met en place – «l’objet formation» dans le projet de l’ergonomie naissante (années 50),” in (Se) Former pour transformer le travail: dynamiques de constructions d’une analyse critique du travail, coords, eds C. Teiger, C. and M. Lacomblez (ETUI and Presses de l’Université Laval).
- Thun, S., Kamsvåg, P. F., Kløve, B., Seim, E. A., in Torvatn, H. Y. (2019). Industry 4.0: Whose revolution? The digitalization of manufacturing work processes. *Nord. J. Work. Life Stud.* 9:e117777. doi: 10.18291/njwls.v9i4.117777
- Ullmann, S. in Fritzsche, L. (2017). Ergonomic Work Design for Older and Performance-restricted Workers using Digital Human Models. In: *Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (Hrsg.), Proceedings of the 5th International Digital Human Modeling*

- Symposium. Dortmund/Berlin/Dresden: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin.
- United Nations (2020). The Sustainable Development Goals Report 2020. New York, NY: United Nations.
- Valenduc, G., in Vendramin, P. (2016). Work in the Digital Economy: Sorting the Old From the New. Brussels: ETUI.
- Waters, T. R., Putz-Anderson, V., in Garg, A. (1994). Applications manual for the revised NIOSH lifting equation. Cincinnati: U.S. Department of Health and Human Services.
- Wiendahl, H-P., Reichardt, J., in Nyhuis, P. (2015) Handbook factory planning and design, 25 edn. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- Zorzenon, R., Lizarelli, F., in Moura, D. (2022). What is the potential impact of industry 4.0 on health and safety at work? Saf. Sci. 153, 105802. doi: 10.1016/j.ssci.2022.105802

