

Program

Digitalna transformacija robotiziranih tovarnih prihodnosti

DIGITOP

Rezultat 9.4:

Predstavitev izboljšanega proizvodnega sistema

Projekt/RRP	D9.4 - Izboljšan proizvodnega sistema
Vrsta dokumenta	Poročilo o rezultatu
Verzija dokumenta	0.1 - osnutek prispevka RUD/IJS
Sodelujoči partnerji	Rudolfovo NM, IJS Ljubljana, Datalab, Biostile
Avtorji	Rok Struna, Primož Kocuvan, Vinko Longar, Jasna Rihter
Datum priprave	30. 6. 2026

Kazalo

1	POVZETEK.....	2
2	IZHODIŠČE IN NAMEN PRISPEVKA.....	3
3	INTEGRACIJA ALGORITMOV V OKOLJE ANYLOGIC	4
4	IZBOLJŠAVE NAPOVEDNEGA VZDRŽEVANJA.....	6
5	IZBOLJŠAVE NA PODROČJU VZDRŽEVANJA V PANTHEONU	8
6	IZBOLJŠAVE NA PODROČJU NADZORA KAKOVOSTI V PANTHEONU	9
7	IZBOLJŠAVE SPREMLJANJA IN NAPOVEDI PORABE ENERGIJE.....	11
8	SIMULACIJSKO PLANIRANJE PROIZVODNJE IN OPTIMIZACIJA RAZPOREDA.....	13
9	PRISPEVEK K IZBOLJŠANEMU DIGITALNEMU DVOJČKU	14
10	BIBLIOGRAFIJA.....	15

1 Povzetek

To poročilo predstavlja prispevek partnerjev Rudolfovo in IJS k rezultatu D9.4, ki obravnava predstavitev izboljšanega proizvodnega sistema ter opis izboljšav vzdrževanja, nadzora kakovosti in porabe energije v izbranem industrijskem primeru uporabe. Splošno predstavitev izboljšanega proizvodnega sistema in njegovo uporabo v poslovnem okolju Pantheon pripravi partner Datalab, pričujoči prispevek pa se osredotoča na tehnične module, ki so bili razviti, nadgrajeni in vključeni v digitalni dvojček.

Glavni poudarek prispevka je integracija algoritmov za napovedno vzdrževanje, izračun porabe energije in simulacijsko planiranje proizvodnje v okolje AnyLogic. Ti moduli izhajajo iz raziskovalnega dela RRp 5, kjer je bil na laboratorijskem sistemu LabTOP preverjen koncept digitalnega dvojčka, v RRp 9 pa so bili rezultati prilagojeni in uporabljeni na realnejšem industrijskem primeru.

Zaradi omejene količine razpoložljivih proizvodnih podatkov je bil za testiranje in demonstracijo pripravljen razširjen nabor delovnih nalogov. Tabela delovnih nalogov je zasnovana tako, da jo uporabljajo energetske moduli, simulacijski model in optimizacijski modul za planiranje. Na ta način je vzpostavljena enotna podatkovna osnova, ki omogoča primerjavo vpliva različnih razporedov in proizvodnih scenarijev na čas izvedbe, predvideno porabo energije in operativna tveganja.

2 Izhodišče in namen prispevka

Raziskovalni paket RRp 9 nadaljuje rezultate RRp 5, kjer je bil digitalni dvojček najprej razvit in potrjen v laboratorijskem proizvodnem sistemu LabTOP. V laboratorijski fazi je bil poudarek na vzpostavitvi integriranega koncepta ERP+MES, simulacijskega modela, AI modulov in podpornih algoritmov za napovedovanje vzdrževanja, nadzor kakovosti ter ocenjevanje porabe energije.

V RRp 9 je bil cilj rezultate prenesti v realnejši industrijski kontekst in jih prilagoditi uporabniškemu primeru izbranega podjetja Biostile d.o.o.

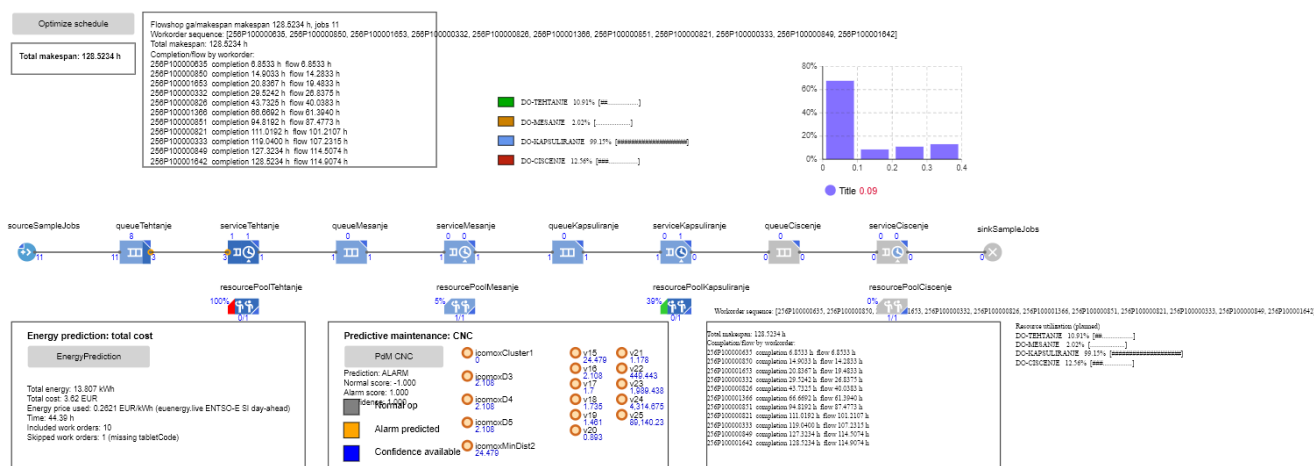
- testna instalacija BISTILE baza 10.203.80.14 (s podatki stranke)
- testna instalacija TERMINAL baza 10.11.12.15 (testni podatki)

V tem okviru je bila pripravljena nadgradnja digitalnega dvojčka, ki omogoča povezovanje poslovnih podatkov, proizvodnih nalogov, senzorskih podatkov in simulacijskega okolja. Vloga RUD in IJS je bila predvsem v pripravi, integraciji in razlagi algoritmičnih modulov, medtem ko Datalab pripravi opis uporabe v Pantheonu in širšo predstavitev proizvodnega sistema.

Izboljšave so bile obravnavane na treh povezanih ravneh. Prva raven je napovedno vzdrževanje na podlagi podatkov iCOMOX senzorja in alarmnih stanj. Druga raven je napoved porabe energije na podlagi tipa izdelka, količine in cene električne energije. Tretja raven je planiranje delovnih nalogov kot flow-shop problem, kjer se išče zaporedje proizvodnih nalogov, ki izboljša izbrane kriterije, na primer skupni čas izvedbe ali zamude glede na roke.

3 Integracija algoritmov v okolje AnyLogic

V sklopu priprave izboljšane digitalnega dvojčka so bili algoritmi vključeni v obstoječi model AnyLogic. Integracija je bila zasnovana tako, da lahko simulacijski model ob kliku uporabniškega gumba zažene ustrezno Python skripto, prejme rezultat v strukturirani obliki in ga prikaže v uporabniškem vmesniku modela. S tem ostane simulacijski model pregleden, hkrati pa so algoritmi ločeni v samostojne skripte, ki jih je mogoče testirati in nadgrajevati neodvisno od AnyLogic modela.

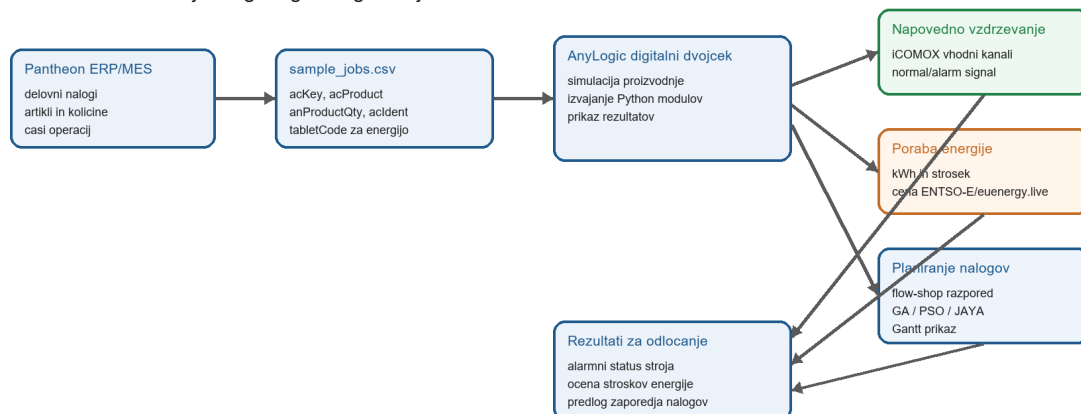


Slika 1: Anylogic model s UI moduli za planiranje, napovedno vzdrževanje in napoved rabe energije

Osrednji vhodni vir za energetske del in planiranje je datoteka sample_jobs.csv. V demonstracijski izvedbi predstavlja izvoz oziroma pripravljeno tabelo delovnih nalogov iz Pantheona. Vsebuje šifro delovnega naloga, operacijsko zaporedje, tip izdelka, količino, operacijo, predvideni čas operacije in dodatno šifro izdelka za energetske model. Ker so bile za nekatere izdelke energetske kalkulacije pripravljene samo za omejeno število tipov kapsul, se delovni nalogi brez ustreznega tabletCode izločijo iz energetskega izračuna, vendar lahko še vedno nastopajo v simulacijskem planiranju.

Za testiranje scenarijev je bil pripravljen generator delovnih nalogov. Generator iz obstoječih realnih zapisov ohrani strukturo delovnega naloga, zaporedje operacij in razmerja med količino ter časom operacije, nato pa ustvari večje število smiselno zaokroženih proizvodnih nalogov. Tako je mogoče v simulacijskem okolju preveriti obnašanje energetskega in planirnega modula tudi pri večjem številu nalogov, kot jih je bilo na voljo v začetnem naboru podatkov.

Podatkovni tok izboljšanega digitalnega dvojčka



Slika 2: Podatkovni tok med Pantheonom, datoteko delovnih nalogov, AnyLogic modelom in algoritmičnimi moduli.

Pregled integriranih modulov je podan v Tabeli 1. Moduli uporabljajo skupno podatkovno osnovo, vendar imajo različne izhode in različne vloge v izboljšanem digitalnem dvojčku.

Modul	Vhodni podatki	Glavni izhod	Vloga v digitalnem dvojčku
Napovedno vzdrževanje	iCOMOX vhodni kanali in alarmni primeri	normalno stanje ali alarm	zgodnje opozarjanje na tveganje obratovanja stroja
Poraba energije	sample_jobs.csv, tabletCode, količina, cena elektrike	kWh, strošek in čas izdelave	ocena energetskega vpliva proizvodnih nalogov
Planiranje proizvodnje	delovni nalogi, operacije in časi izvedbe	zaporedje nalogov in Gantt prikaz	primerjava scenarijev in optimizacija razporeda

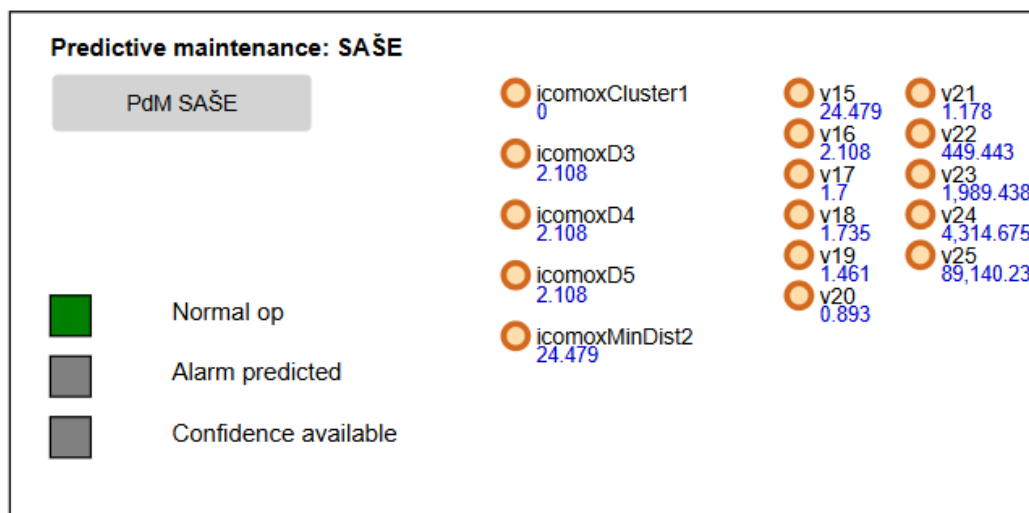
Tabela 1: Pregled vključenih modulov v izboljšanem digitalnem dvojčku.

4 Izboljšave napovednega vzdrževanja

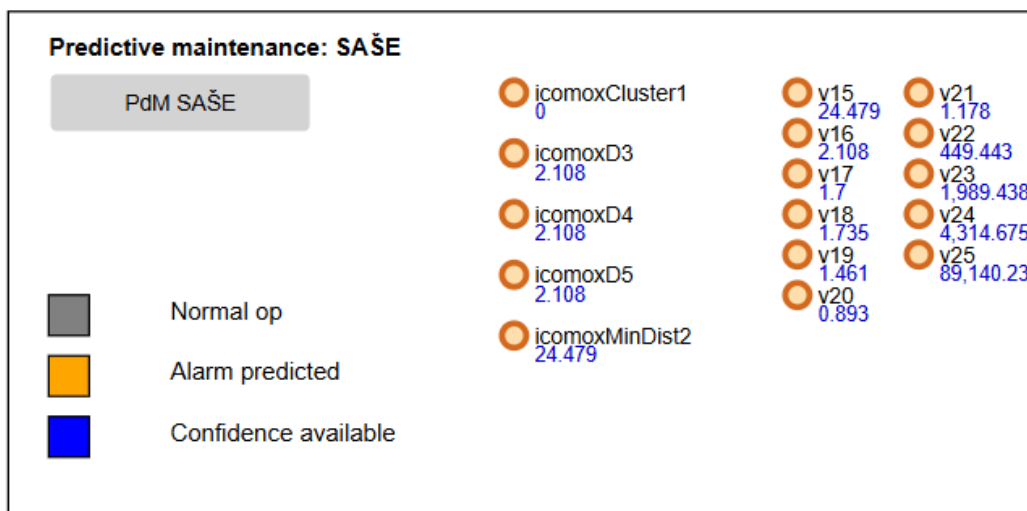
Modul napovednega vzdrževanja temelji na podatkih iCOMOX senzorja. V novem industrijskem primeru je bil predviden en iCOMOX senzor, zato je bila integracija v AnyLogic poenostavljena na eno smiselno mesto v proizvodnem modelu. Vhod v model predstavlja enajst senzorskih kanalov, ki opisujejo trenutno stanje senzorja oziroma stroja. Med kanali so meritve temperature, pospeškov, magnetnega polja in drugi signali, uporabljeni v učni množici.

V prejšnjem laboratorijskem modelu so bili uporabljeni starejši modeli, vezani na več senzorjev in brez neposrednega vključevanja alarmnega stanja. V nadgrajeni izvedbi je bil uporabljen nov model za predikcijo alarmnega stanja. Model vrne razred normalnega obratovanja ali razred alarma ter dodatne vrednosti, ki služijo kot ocena zaupanja oziroma razdalje do odločitve. Na ta način je rezultat uporaben za prikaz v digitalnem dvojčku in za kasnejše povezovanje z logiko planiranja ali vzdrževalnimi ukrepi.

Ker v fazi demonstracije ni bil vzpostavljen neprekinjen dotok realnih alarmnih dogodkov v AnyLogic, je bil za testiranje pripravljen generator vhodnih podatkov. Ta ne generira popolnoma poljubnih vrednosti, temveč izbira realistične kombinacije iz podatkovnega nabora, na katerem je bil model razvit. V večini primerov se uporabi normalen primer, manjši delež pa predstavlja alarmni primer. S tem je obnašanje modela v simulaciji bolj realistično kot pri povsem naključnem generiranju posameznih kanalov.



Slika 3: Prikaz rezultata napovednega vzdrževanja v primeru normalnega obratovanja.



Slika 4: Prikaz rezultata napovednega vzdrževanja v primeru napovedanega alarma.

Takšna integracija predstavlja osnovo za nadaljnjo uporabo napovednega vzdrževanja v proizvodnem planiranju. V naslednjih razvojnih korakih se lahko alarmni signal uporabi kot omejitev ali utež pri razporejanju, na primer za preusmeritev nalogov, zmanjšanje obremenitve določenega stroja ali sprožitev vzdrževalnega posega pred kritično odpovedjo.

5 Izboljšave na področju vzdrževanja v PANTHEONU

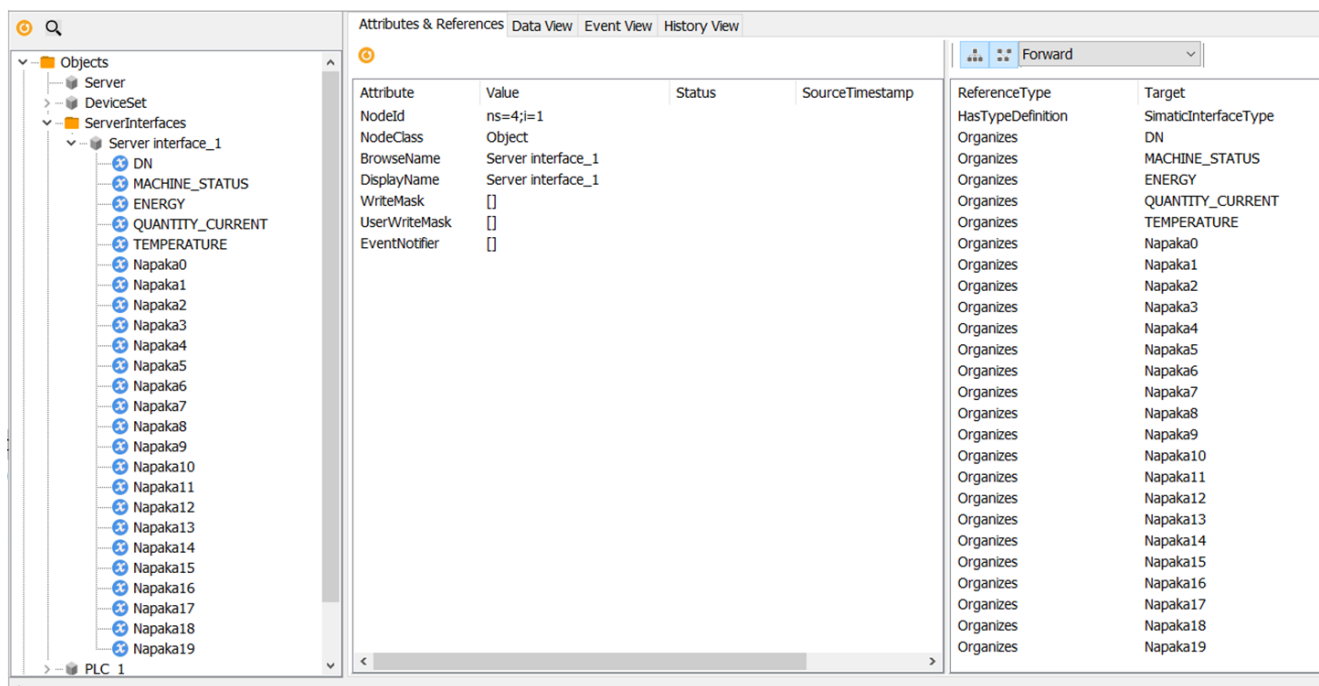
V obravnavanem obdobju so se aktivnosti na področju vzdrževanja osredotočale na nadaljnji razvoj funkcionalnosti za učinkovitejše upravljanje servisnih aktivnosti ter podporo digitalnemu spremljanju proizvodnih procesov.

Razvite in nadgrajene so bile funkcionalnosti za upravljanje servisnih delovnih nalogov, vključno z razširitvijo podatkov na servisnih opravilih, podporo servisnim nalogom za tuje naprave ter možnostjo upravljanja servisnih aktivnosti po vozilih. Večina dela je bila narejena na izboljšanju uporabniškega vmesnika ter prenovi na Angular.

Največji fokus je bil na dodanih funkcionalnostih kot so:

- Spremljanje servisnih nalogov po tujih napravah ki niso v lasti podjetja
- Spremljanje planiranja delovnih nalogov po resursih
- Vključevanje upravljanja po vozilih na servisni DN
- Izboljšanje komponente dokumentacije
- Izboljšanje uporabniške izkušnje dopolnitve UI ter prenova na Angular.

Na področju OPC UA dopolnitev v Pantheon smo integrirali dodatne parametre in podatke kot so status stroja, energija, trenutna količina in temperatura.



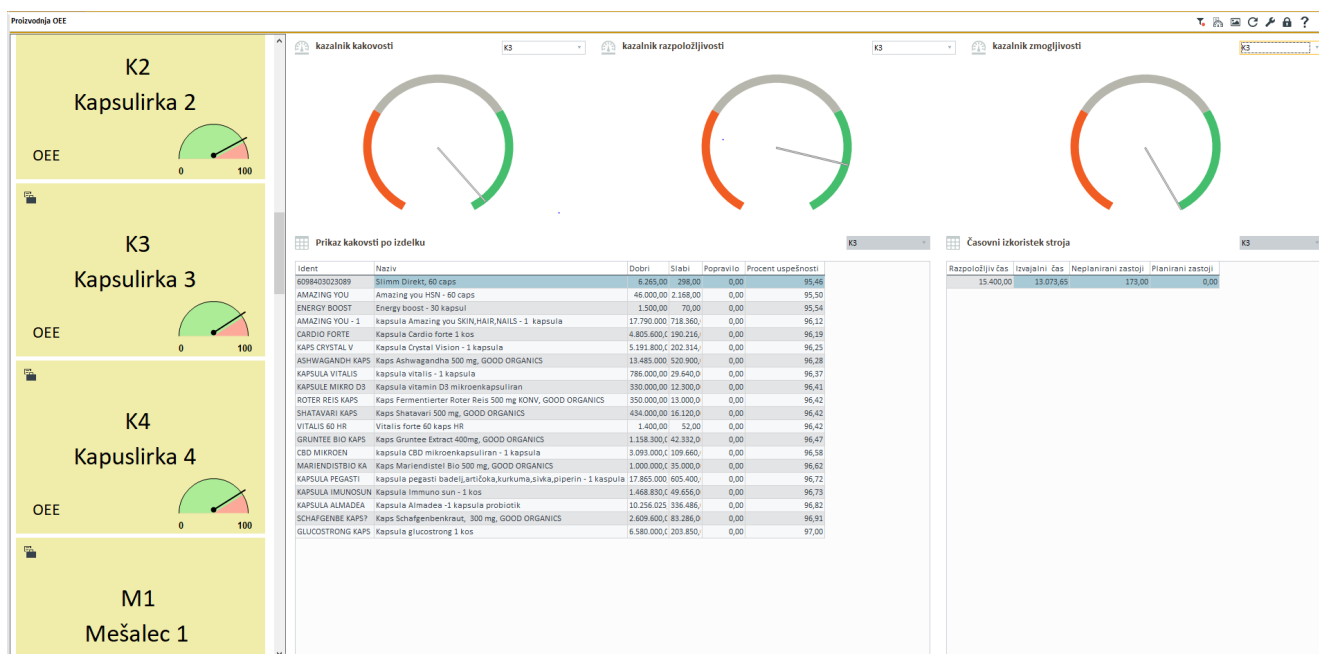
Slika 5: Prikaz novih spremeljkv integriranih v Pantheon

Nadaljevale so se tudi aktivnosti razvoja planiranja servisov v spletni aplikaciji, pri čemer so bile analizirane različne tehnološke možnosti, pripravljeni prototipi uporabniškega vmesnika ter izvedena njihova validacija.

<https://www.figma.com/proto/k5OnqLfUO5z4wFWUdpqaTx/PA-Manufactrue?node-id=35194-29750&viewport=24593%2C28191%2C0.69&t=JY99j0cbuG5sni80-8&scaling=scale-down&content-scaling=fixed&starting-point-node-id=34488%3A10161&page-id=34488%3A8232&hide-ui=1>

6 Izboljšave na področju nadzora kakovosti v PANTHEONU

Na področju nadzora kakovosti so bile aktivnosti usmerjene v izboljšanje spremljanja proizvodnih kazalnikov ter zagotavljanje zanesljivosti zajetih proizvodnih podatkov. Nadaljeval se je razvoj funkcionalnosti za izračun kazalnikov OEE, pripravljena so bila nova poročila in izvedene prilagoditve izračunov glede na zahteve uporabnikov. Poseben poudarek je bil namenjen pripravi testnih scenarijev, validaciji rezultatov ter odpravi ugotovljenih nepravilnosti, s čimer je bila izboljšana kakovost in zanesljivost prikazanih proizvodnih informacij.



Slika 6: Prikaz OEE kazalnika v Pantheonu

Izvedene so bile tudi ZEUS analize, ki so omogočile podrobnejše spremljanje proizvodnih procesov in preverjanje pravilnosti zajema podatkov.

Razvite so bile dodatne funkcionalnosti za razširitev podatkov na operacijah in materialih z uporabo poljubnih polj z namenom vnosa podatkov o kakovosti in sicer meritev med postopkom izdelave.

Seznam delovnih nalogov **Izdaja materiala** Operacije Prevzem Dokumenti ✓ Potrdi ×

Ključ: 26-6P1-000002 Pozicija: 144 Material: 001442 - Magnesium salts of fatty acids (E470b)

Količina

− 0 G + 

/50 G

Odpadek

− 0 G +

/0 G

Odgorek

− 0 G + 

/0 G

Datum

 29.06.2026

Skladišče

Skladišče MATERIALA O1

Zaloga: 25256,15 G

Pregled povezanih dokumentov

Poljubna polja

Custom text 

Custom number

Custom select ▼

Custom textarea

Izdana količina: 0,00/50,00 G

Odgorek: 0,00/0,00 G

Odpadek: 0,00/0,00 G

Slika 7: Prikaz uporabe poljubnih polj

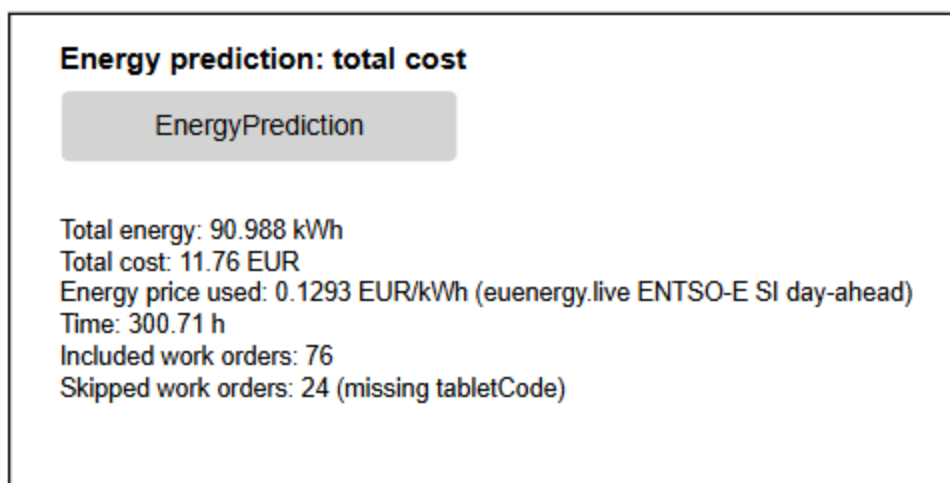
Aktivnosti so obsegale pripravo podatkovnega modela, razvoj API-vmesnikov, implementacijo validacijskih pravil, uporabniškega vmesnika ter avtorizacij, kar omogoča prilagajanje sistema specifičnim zahtevam posameznega proizvodnega procesa in izboljšuje kakovost razpoložljivih proizvodnih podatkov.

7 Izboljšave spremljanja in napovedi porabe energije

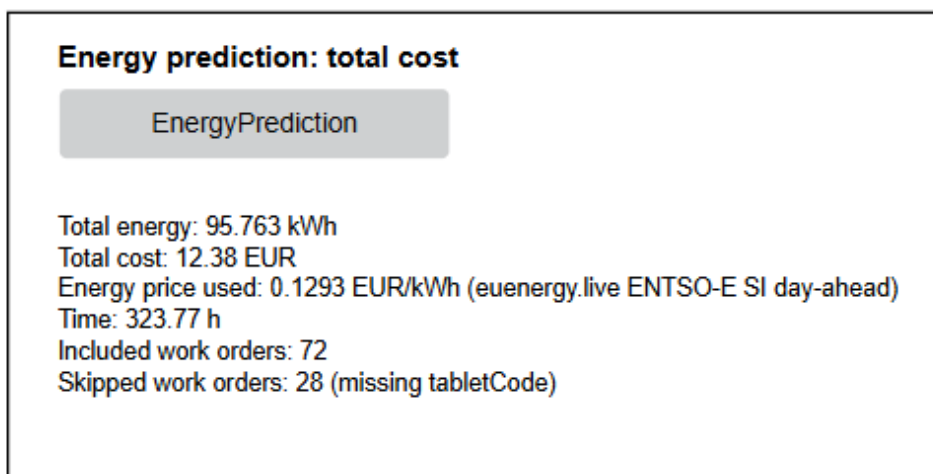
Energetski modul je bil zasnovan kot kalkulacija porabe energije in stroška za delovne naloge, ki so zapisani v datoteki `sample_jobs.csv`. Osnova izračuna je tip kapsule oziroma `tabletCode`, število izdelanih kosov in izračunana poraba energije na enoto izdelka. Za tipe kapsul, za katere so bili pripravljeni energetski podatki, modul izračuna skupno porabo v kWh, skupni strošek in ocenjeni proizvodni čas. Delovni nalogi brez ustrezne šifre `tabletCode` se v energetskem delu izpustijo in se prikažejo kot izpuščeni nalogi.

V demonstracijski različici so v tabeli uporabljeni štiri tipi izdelkov: KAPSULA ALMADEA, KAPSULA PEGASTI, KAPSULA VITALIS in KAPSULA IMUNOSUN. Energetska kalkulacija je pripravljena za tri tipe oziroma skupine kapsul, zato se KAPSULA IMUNOSUN v energetskem izračunu namenoma izpusti. Takšno obnašanje je pomembno, ker v digitalnem dvojčku jasno pokaže razliko med podatki, ki so primerni za energetsko napoved, in podatki, ki zahtevajo dodatno parametrizacijo.

Za oceno stroška električne energije je v modul vključena možnost uporabe tržne cene električne energije. V testni izvedbi se cena pridobi prek javnega vira `euenergy.live`, ki uporablja podatke ENTSO-E za slovensko območje. Če cena ni dosegljiva ali žeton za dostop ni nastavljen, modul uporabi privzeto ceno 0,20 EUR/kWh. V AnyLogic prikazu se zato poleg porabe in stroška prikaže tudi uporabljena cena in njen vir.



Slika 8: Primer energetskega izračuna za generirane delovne naloge v AnyLogic modelu.

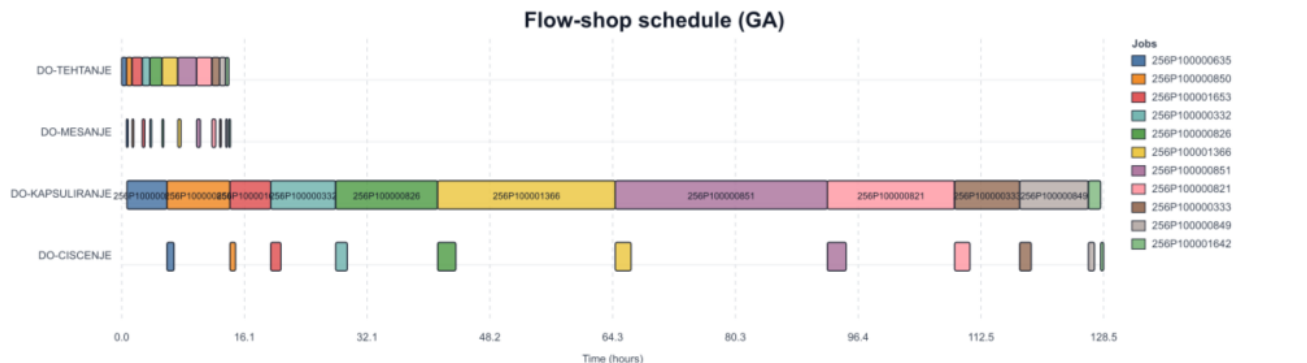


Slika 9: Prikaz energetskega izračuna z drugim razmerjem delovnih nalogov in drugačno skupno porabo.

Ker je bilo začetnih proizvodnih podatkov malo, je bil za testiranje energetskega modula pripravljen generator večjega števila nalogov. Generator ohrani iste tipe izdelkov in strukturo operacij, količine pa spreminja v smiselni mejah. To omogoča preverjanje, kako se poraba in strošek spremenita pri različnih razmerjih med izdelki in različnih velikostih naročil. Ista datoteka se nato uporablja tudi kot vhod za simulacijsko planiranje, zato je povezava med energetske in planirnim modulom neposredna.

8 Simulacijsko planiranje proizvodnje in optimizacija razporeda

Planirni del obravnava proizvodnjo kot flow-shop problem. Vsak delovni nalog predstavlja job, vsaka vrstica v datoteki `sample_jobs.csv` pa predstavlja operacijo tega naloga na določeni proizvodni postaji oziroma stroju. Zaporedje operacij je določeno s stolpcem `anNo`, čas obdelave pa s stolpcem `anTotalTime`. Iz teh podatkov se zgradi matrika časov obdelave, ki je osnova za izračun začetkov in koncev operacij ter za izdelavo Ganttovega prikaza. V repozitoriju `flowshop_soo-main` je pripravljena Python implementacija planirnega algoritma. Skripta zna prebrati CSV ali TSV podatke z delovnimi nalogi, samodejno zazna ločilo, normalizira decimalne vejice in preveri zahtevane stolpce. Podprti so genetski algoritem, optimizacija z rojem delcev in JAYA hevrstika. V razširjeni različici je poleg minimizacije makespan podprta tudi optimizacija povprečne oziroma skupne zamude glede na roke, ki se berejo iz dodatne datoteke z dobavnimi časi. Cilj osnovnega planirnega problema je najti zaporedje delovnih nalogov, ki zmanjša skupni čas dokončanja proizvodnje. Pri tem mora vsak nalog skozi vse predvidene operacije v pravilnem vrstnem redu, posamezna operacija pa se lahko začne šele, ko je končana predhodna operacija istega naloga in ko je prost ustrezen stroj. Pri cilju zamud se po zaključku zadnje operacije primerja čas dokončanja naloga z njegovim rokom, optimizacija pa skuša zmanjšati skupno ali povprečno zamudo. Aplikacija za optimizacijo izdelovalnega časa je povezana z AnyLogic preko Python vmesnika. Namen povezave je, da se ista datoteka delovnih nalogov uporablja za energetske izračune in za simulacijsko optimizacijo razporeda. Tako lahko uporabnik najprej generira ali uvozi delovne naloge, nato izračuna pričakovano porabo energije in strošek, z optimizacijskim modulom pa preveri še razporeditev nalogov v času.



Slika 10: Primer Ganttovega diagram razporeda delovnih nalogov na podlagi podatkov iz `sample_jobs.csv`.

Na sliki 6 je prikazan Ganttov diagram, ki se ustvari ob klicu aplikacije za optimizacijo razporeda delovnih nalogov. Poleg optimiziranega zaporedja, Anylogic prikazuje vrednost kriterijske funkcije skupnega izdelovalnega časa (makespan) in izračun makespan-a za posamezni delovni nalog ter obremenitvijo postaj. S tem digitalni dvojček omogoča bolj celovito podporo odločanju: uporabnik bo lahko primerjal časovno učinkovitost, energetske vpliv in morebitna vzdrževalna tveganja za isti nabor proizvodnih nalogov.

9 Prispevek k izboljšanemu digitalnemu dvojčku

Prispevek RUD in IJS k rezultatu D9.4 je predvsem v povezavi raziskovalnih algoritmov z uporabno simulacijsko plastjo digitalnega dvojčka. Posamezni algoritmi niso več obravnavani kot ločeni izračuni, temveč kot funkcionalni moduli, ki uporabljajo skupne proizvodne podatke in rezultate vračajo v AnyLogic model. To izboljša preglednost demonstracije in omogoča nadaljnje povezovanje z rešitvami v Pantheonu.

Na področju vzdrževanja nadgradnja omogoča prikaz alarmnega stanja na podlagi senzorskih vhodov. Na področju porabe energije omogoča izračun stroška delovnih nalogov glede na tip izdelka, količino in aktualno oziroma privzeto ceno električne energije. Na področju planiranja pa omogoča obravnavo delovnih nalogov kot optimizacijskega problema, kjer je mogoče primerjati različna zaporedja in njihove posledice za čas proizvodnje.

Skupni učinek teh izboljšav je bolj uporaben digitalni dvojček, ki ni namenjen samo vizualizaciji proizvodnega procesa, temveč tudi podpori odločanju. Sistem omogoča izvajanje scenarijev, preverjanje vpliva sestave naročil, oceno porabe energije in pripravo podlage za prihodnje vključevanje napovednega vzdrževanja v planiranje proizvodnje.

10 Bibliografija

- [1] Sci-kit learn programski modul (knjižnica Pythona), Dostopno: <https://scikit-learn.org/stable/>, 6.6.2026
- [2] ONNX Runtime, programska knjižnica za izvajanje modelov strojnega učenja v formatu ONNX, Dostopno: <https://onnxruntime.ai/>, 18.6.2026
- [3] PuLP programski paket za reševanje linearno-optimizacijskih problemov, Dostopno: <https://pypi.org/project/PuLP/>, 6.6.2026
- [4] AnyLogic, simulacijsko okolje za diskretne dogodke, sistemsko dinamiko in agentno modeliranje, Dostopno: <https://www.anylogic.com/>, 18.6.2026
- [5] ENTSO-E Transparency Platform in [euenergy.live](https://euenenergy.live), vir podatkov za dnevne cene električne energije, Dostopno: <https://transparency.entsoe.eu/> in <https://euenenergy.live/>, 18.6.2026
- [6] Dokumentacija skripte `flowshop_soo-main`: implementacija flow-shop planiranja z GA, PSO in JAYA hevrstiko, interno gradivo projekta DIGITOP, 18.6.2026