

» Energetska učinkovitost avtomatiziranih regalnih skladiščnih sistemov pri uporabi tehnologije regeneracije energije: primer avtomatskega skladiščenja v jeklarski industriji

Marko Motaln
Boris Jerman
Anja Žagar
Jurij Hladnik
Tone Lerher

Z namenom doseganja visoke zalogovne velikosti in zahtevane pretočne zmogljivosti se tudi v jeklarski industriji vse pogosteje uporabljajo avtomatizirani regalni skladiščni sistemi za uskladiščenje težkih polizdelkov oz. jeklenih palic in profilov, nameščenih v namenskih kasetah. Izrazito visoka teža jeklenih palic in profilov ter zahtevane pretočne zmogljivosti z dodatnimi zahtevami tehnično robustnega in visoko učinkovitega skladišča, prinaša s sabo tudi visoko potrošnjo električne energije za delovanja skladišča. V članku je na primeru avtomatiziranega regalnega skladišča za jeklene palice in profile predstavljena možnost zmanjšanja porabe električne energije z uporabo koncepta regeneracije pri zaviranju regalnega dvigala in spuščanju dvižne mize regalnega dvigala.

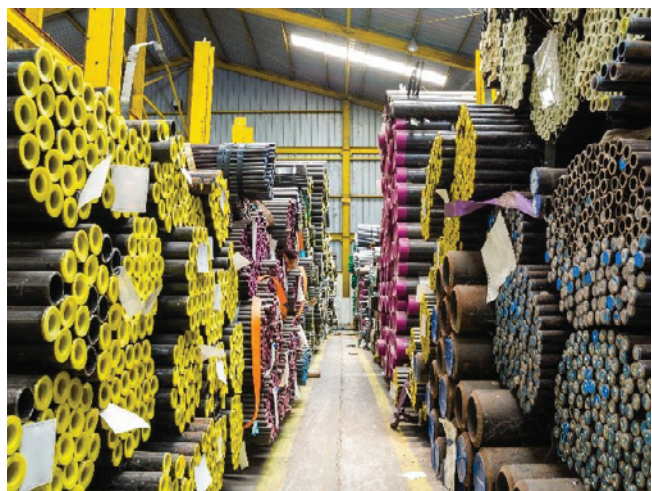
V prvem delu članka je predstavljena konfiguracija avtomatiziranega regalnega skladišča za dolge in težke jeklene palice in profile, pri čemer so obravnavani ključni vidiki tehnične in stroškovne učinkovitosti skladišča. Za izbrano skladišče s predhodno izvedeno pretočno analizo smo podrobno analizirali vpliv porabe in regeneracije energije pri izvajanju dvojnega delovnega cikla regalnega dvigala za izrazito težke tovore. Ugotovili smo, da navedeni skladiščni sistemi zaradi izrazito težkih tovorov in visoke pretočne zmogljivosti porabijo sorazmerno veliko električne energije ter da lahko porabo zmanjšamo za okoli tretjino z uporabo koncepta regeneracije energije pri zaviranju vožnje regalnega dvigala in spuščanju dvižne mize regalnega dvigala z bremenom. Ugotovitve naše analize kažejo velik pomen trajnostno usmerjenega pristopa pri načrtovanju skladišča in sorazmerno visoke prihranke energije pri uporabi regeneracije v avtomatiziranih regalnih skladiščih.

Uvod

Jeklarska industrija predstavlja pomemben dejavnik v gospodarstvu in predstavlja v letu 2021 v Evropski uniji obseg 56 milijonov metričnih ton vroče valjanih jeklenih polizdelkov in izdelkov (Hot Rolled Long Steel Worldwide Production by Region, b. d.).

Podjetja v jeklarski industriji imajo v svojem proizvodnem asortimaju več vrst izdelkov različnih dimenzij in velikosti, med katerimi so tudi jeklene palice in profili različnih dolžin (od 6 do 10 me-

trov). Na koncu proizvodne linije oz. valjarske proge se jeklene palice in profili z enakimi atributi ovijejo v zavitek, ki ga imenujemo tudi snop jeklenih palic in profilov. Uskladiščenje jeklenih palic in profilov se še vedno v veliko primerih izvaja talno v igličaste regale. Posledično je skladiščni prostor sorazmerno slabo izkoriščen po višini, velik izziv pa predstavlja sledljivost pri prelaganju snopov jeklenih palic in profilov. Za manipulacijo snopov jeklenih palic in profilov se najpogosteje uporablja mostni žerjav, ki se večinoma uporablja za komisioniranje in odpremo snopov jeklenih palic in profilov (Kim & Hong, 2006; Tang idr., 2012; Wan idr., 2009).

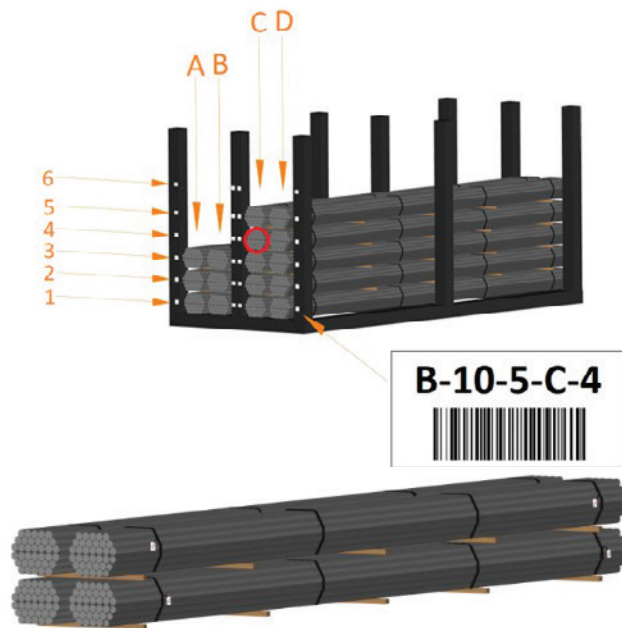


» Slika 1: Talno odlaganje snopov jeklenih palic in profilov (Stock Photos, Royalty-Free Images, Graphics, Vectors & Videos, b. d.)



Marko Motaln^{a,c}, **Boris Jerman**^b, **Anja Žagar**,
Jurij Hladnik^b, **Tone Lerher**^{a,c} • ^aUniverza v Mariboru,
Fakulteta za strojništvo, ^bUniverza v Ljubljani, Fakulteta za
strojništvo, ^cUniverza v Mariboru, Fakulteta za logistiko

Z uporabo igličastih regalov onemogočamo prevračanje snopov jeklenih palic in profilov (Lerher idr., 2019). Kljub sorazmerno široki uporabi igličastih regalov za skladiščenje snopov jeklenih palic in profilov pa le-ti predstavljajo izziv pri prelaganju snopov jeklenih palic in profilov na drugo (prosto) lokacijo v skladišču. To nam povečuje stroške dela, podaljšuje čas odpreme in otežuje sledenje toka materiala. Z izrazitim prelaganjem snopov jeklenih palic in profilov se stroški notranje logistike bistveno povečajo, pri čemer produktivnost izrazito upade. Navedeno problematiko imenujemo v logistiki premestitveni izziv (angl. Relocation challenge) (Kim & Hong, 2006; Tang idr., 2012), za katerega je bil med drugimi predlagan tudi hevrstičen pristop za zmanjšanje števila premestitev za izbrani primer v jeklarski industriji (Marolt & Lerher, 2018).



» Slika 2: Označevanje snopov jeklenih palic v igličastih regalih (Lerher idr., 2019)

V zadnjih nekaj desetletjih se je delež avtomatiziranih regalnih skladiščnih sistemov (angl. Automated Storage and Retrieval System, AS/RS), tudi v jeklarski industriji, izrazito povečal. Ti skladiščni sistemi imajo relativno majhno tlorisno površino in posledično visoko zalogovno velikost. Delovanje regalnega skladišča temelji na regalnem dvigalu za sočasno vožnjo v vodoravni smeri in pomikov v navpični smeri, ki je izveden z dvižno mizo regalnega dvigala. Regalno dvigalo oskrbuje skladiščni regal na levi in desni strani regalnega hodnika in lahko doseže katerokoli naključno izbrano skladiščno lokacijo.

Pri pregledu literature znanstvenoraziskovalnih del o skladiščnih sistemih izrazito težkih tovorov in tovorov večjih dimenzij ne zasledimo velikega števila znanstvenih del. Eden izmed razlogov je ta, da se največ artiklov še vedno skladišči na paletah, sledijo artikli, skladiščeni v zabojčkih, preostanek pa predstavljajo druge oblike transportno-skladiščnih enot, med katerimi so tudi takšne, ki so primerne za skladiščenje izrazito težkih tovorov in tovorov večjih dimenzij (Rushton idr., 2014). Izrazito težki tovari večjih dimenzij predstavljajo velik izziv pri učinkovitem skladiščenju, saj zahtevajo prilagoditev transportno-skladiščne tehnike (Nagasawa idr., 1975; Rushton idr., 2014). Avtorja (Yuan & Tang, 2017) sta v svoji raziskavi ugotovila, da se skladiščni sistemi izrazito težkih tovorov in tovorov večjih dimenzij uporabljajo predvsem v jeklarski industriji, kontejnerskih terminalih in drugih kovinskopredelovalnih panogah.

Skladiščni sistemi izrazito težkih tovorov in tovorov večjih dimenzij, kot so snopi jeklenih profilov ali koluti, se v osnovi skla-

diščijo talno na prosto odlagalno mesto. Skladiščenje se izvaja po konceptu, da so snopi jeklenih profilov ali koluti naloženi drug vrh drugega, pri čemer mostno dvigalo zagotavlja manipulacijo tovara. V primeru odpreme izbranega snopa jeklenih profilov oziroma kolutov je potrebno prelaganje na najbližje prosto odlagalno mesto.

Prve raziskave reševanja problematike s področja tehnologije talnega skladiščenja izrazito težkih tovorov in tovorov večjih dimenzij se nanašajo na minimizacijo premikov jeklenih plošč, kolutov in profilov z namenom zagotavljanja nemotenega proizvodnega procesa in procesa odpreme. Tako so avtorji (Tang idr., 2002) prvi reševali problem premikov jeklenih plošč z namenom boljšega razporejanja delovnih nalog pri valjanju jeklenih plošč. Z uporabo matematičnega modela in simulacije z genetskimi algoritmi so minimizirali premike jeklenih plošč. Avtorji (Tang idr., 2012) so v svojem znanstvenem delu obravnavali dva problema premikov, ki se nanašajo na premike jeklenih kolutov in jeklenih plošč. Na področju transporta jeklenih kolutov so predlagali matematični model linearnega programiranja in izvedli simulacijo, ki je temeljila na minimizaciji nepotrebnih premikov jeklenih kolutov, ki so skladiščeni v dveh nivojih. Na področju manipulacije jeklenih plošč so avtorji predlagali matematični model za učinkovitejši premik jeklenih plošč.

Poleg raziskav, ki se navezujejo na minimiziranje premikov snopov jeklenih profilov in kolutov, lahko zasledimo tudi raziskave, ki temeljijo na vodenju mostnega dvigala. Avtorja (Zhao & Tang, 2010) sta v svojem znanstvenoraziskovalnem delu predlagala matematični model manipulacije jeklenih plošč, kjer sta upoštevala manipulacijsko pot mostnega dvigala in z njo povezane stroške. Avtorji (Maschietto idr., 2016) so v svojem delu predlagali matematični model za vodenje dveh mostnih dvigal z uporabo genetskega algoritma z namenom optimalnega nalaganja kolutov na tovorno vozilo za odpremo. Avtorji (Xie idr., 2014) so v svojem znanstvenoraziskovalnem delu združili izziv minimizacije premikov jeklenih kolutov in optimizacije vodenja več mostnih dvigal z uporabo matematičnega modela linearnega programiranja in simulacije.

Raziskave minimizacije premikov izrazito težkih tovorov in raziskave vodenja mostnega dvigala so spodbudile avtorje k proučevanju povečanja pretočne zmogljivosti skladiščnega sistema. Avtorja (Zäpfel & Wasner, 2006) sta za skladiščenje snopov jeklenih profilov predstavila matematični nelinearni optimizacijski model in izvedla simulacijo, ki omogoča učinkovitejšo pretočno zmogljivost skladišča. (Šourek & Seidlova, b. d.) sta obravnavala skladišče jeklenih profilov iz prakse, kjer so jekleni profili uskladiščeni v konzolnih regalih. Predstavila sta več možnih variant za načrtovanje skladiščnih regalov za doseganje maksimalne zmogljivosti skladišča. Avtorji (Yuan & Tang, 2017) ter (Zhao & Tang, 2010) so optimirali prostor in manipulacijski čas vožnje mostnega dvigala v skladišču jekla. Uporabili so dinamično programiranje in simulacijo s ciljem minimizacije manipulacijskega časa, ki ga mostno dvigalo porabi za skladiščenje, odpremo in premeščanje jeklenih kolutov.

Iz pregleda znanstvene literature skladiščnih sistemov izrazito težkih tovorov in tovorov večjih dimenzij lahko ugotovimo, da se področje še vedno aktivno razvija. Raziskovalci so v svojih znanstvenoraziskovalnih delih optimirali obstoječa skladišča, ki temeljijo na tehnologiji talnega skladiščenja TSE. Uporabljali so kriterije, ki so pomembni pri optimiranju skladiščnih sistemov. Razvijali so matematične in numerične modele za reševanje problema (minimizacija števila premeščanja snopov jeklenih profilov in kolutov za namen učinkovitejše proizvodnje in odpreme, vpeljava novih strategij, doseganje maksimalne pretočne zmogljivosti skladiščnega sistema, optimizacija vodenja mostnega dvigala). Pri pregledu literature nismo zasledili modela, ki bi se navezoval na nadgradnjo tehnologije talnega načina skladiščenja TSE v avtomatizirano regalno skladišče z uporabo regalnih dvigal.

Raziskave s področja porabe električne energije v paletnih avtomatiziranih skladiščnih sistemih sta predstavila avtorja (Zhou & Mao, 2010). Prikazala sta matematični in simulacijski model z namenom optimizacije uskladiščenja in odpreme materiala. Njun optimizacijski model temelji na minimalni porabi (električne) energije pri uskladiščenju in odpremi materiala (upoštevala sta dodelitev skladiščne lokacije materialom glede na pogostost in težo tovora ter podobnosti med tovari). (Meneghetti & Monti, 2011) sta pojasnila prednost uporabe dvojnih delovnih ciklov z vidika manjše porabe električne energije med vožnjo regalnega dvigala ob upoštevanju oblike skladiščnih regalov. V svojem nadaljnjem delu (Meneghetti & Monti, 2013b) sta razvila model za različne oblike skladišč in težo tovorov z uporabo različnih strategij uskladiščenja (namensko uskladiščenje, naključno uskladiščenje in skladiščenje na osnovi določitve skladiščnih con). Upoštevala sta čas vožnje regalnega dvigala v odvisnosti od oblike skladišča z namenom doseganja maksimalne energijske učinkovitosti skladišča. Avtorji (Bortolini idr., 2017) so razvili »časovni in energijski« model za skladiščenje tovara v enojno globino skladiščnega regala. Model se navezuje na minimizacijo časa vožnje regalnega dvigala in potrebne električne energije. Avtorji (Rajković idr., 2017) so razvili model večnamenske optimizacije, ki zajema minimizacijo stroškov skladiščenja, časa vožnje regalnega dvigala in posledično minimalne izpuste CO₂ ob upoštevanju maksimalne energijske učinkovitosti.

Prve pomembne izsledke na področju regeneracije električne energije sta v svojem znanstvenoraziskovalnem delu predstavila (Meneghetti & Monti, 2013a). Ugotovila sta, da se električna energija pri zaviranju regalnega dvigala in spuščanju dvizne mize lahko shranjuje v kondenzator in se tako ne izgubi v obliki toplotne energije v ozračju. Predstavila sta model porabe električne energije in regeneracije energije pri različnih težah tovorov in oblikah skladiščnih regalov ter pri uporabi različnih skladiščnih strategij glede na frekvenco materialov. Avtorji (Jeran idr., 2017) so predstavili porabo in prihranek električne energije na osnovi uporabe regeneracije energije štirih regalnih dvigal pri zaviranju in spuščanju bremena na primeru iz prakse.

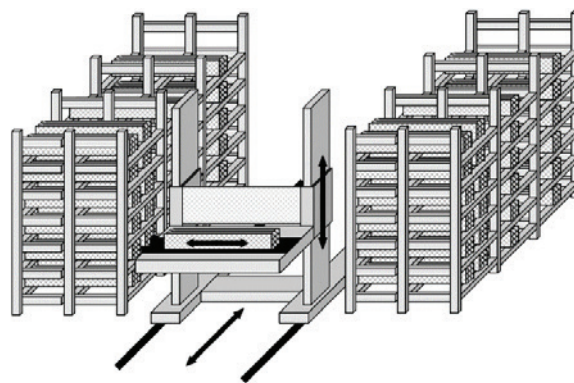
V članku se osredotočamo na študijo primera porabe električne energije pri delovanju regalnega dvigala za težke tovore za primer jeklerske industrije. Raziskana je možnost regeneracije električne energije pri zaviranju regalnega dvigala in pri spuščanju dvizne mize regalnega dvigala. Glavni cilj našega članka je analizirati porabo električne energije med izvajanjem dvojnega delovnega cikla regalnega dvigala in izračunati delež regenerirane energije.

Avtomatizirani regalni skladiščni sistemi za uskladiščenje in odpremo težkih jeklenih palic in profilov

Z namenom večje produktivnosti dela, skrajšanja časa komisioniranja naročil ter izboljšanja sledljivosti materiala, lahko jeklene palice in profile učinkoviteje skladiščimo v popolnoma avtomatiziranem skladiščnem sistemu (AS/RS) v obliki satovja (angl. Honeycomb), kot je prikazano na sliki 3. Skladiščni sistem deluje na principu zamenljivih kaset za uskladiščenje in odpremo v skladiščnem regalu.

Dimenzioniranje regalnega skladiščnega sistema za jeklene palice in profile

Izhodišče pri načrtovanju skladišča so vhodni podatki, ki se navezujejo na skladiščni prostor, dimenzijo kasete za jeklene palice in profile ter predvideno maso polne kasete. Kasete z jeklenimi palicami in profili so zasnovane s pravokotnim okvirjem za odlaganje jeklenih palic in profilov ter s stabilnimi stebrički, ki preprečujejo njihovo prevračanje. Kasete so prilagojene za lažje avtomatizirano uskladiščenje in odpremo v regalna okna.

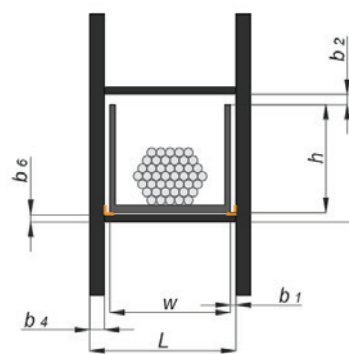


» Slika 3: Avtomatizirani regalni skladiščni sistem z regalnim dvigalom za manipulacijo težkih tovorov v kasetah. (VDI 4418 – Automated storage systems for long and flat-shaped goods, 2000)

H	Višina skladišča	20	[m]
HRS	Uporabna višina skladišča	17,96	[m]
W	Širina skladišča	30	[m]
WRS	Uporabna širina skladišča	22,65	[m]
h	Višina TSE	0,59	[m]
w	Širina TSE	0,66	[m]
g	Dolžina TSE	10	[m]
M	Nosilnost kasete	4.000	[kg]

» Preglednica 1: Vhodni podatki za dimenzioniranje regalnega skladišča

Glede na osnovno dimenzijo kasete dimenzioniramo regalno okno skladiščnega regala, kot je prikazano na sliki 4.



» Slika 4: Regalno okno za uskladiščenje kaset jeklenih palic in profilov (Lerher idr., 2019).

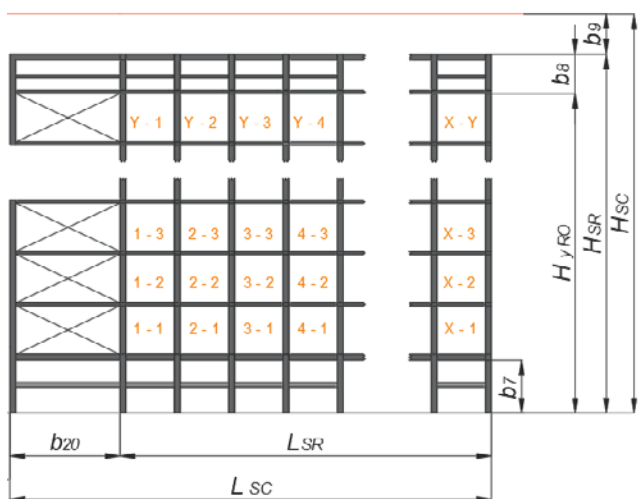
V preglednici 2 so navedene dimenzije regalnega okna skladiščnega regala.

b ₁	Varnostni dodatek za širino regalnega okna	30	[mm]
b ₂	Varnostni dodatek za višino	70	[mm]
b ₄	Širina stebra	140	[mm]
b ₆	Višina nosilca	40	[mm]
L	Dolžina regalnega okna	860	[mm]

» Preglednica 2: Dimenzije regalnega okna skladiščnega regala

Glede na dimenzije skladiščnega objekta dimenzioniramo skladiščni regal, ki se sestoji iz regalnih oken v vodoravni in v navpični smeri, kot je prikazano na sliki 5.

V preglednici 3 so navedene dimenzije skladiščnega regala.



» Slika 5: Skladišni regal za uskladiščenje kaset jeklenih palic in profilov (Lerher idr., 2019).

b_7	Odmik regala od tal	0,76	[m]
b_8	Dodatek na vrhu regalne konstrukcije	0,50	[m]
b_9	Varnostni dodatek za višino skladišča	1,54	[m]
N_y	Št. regalnih oken v navpični smeri	25	[-]
H_{SR}	Višina regalnega skladišča	18,76	[m]
H_{SC}	Višina skladiščnega objekta	20,3	[m]
H_{yRO}	Skupna višina regalnih oken	18,26	[m]
L_{SR}	Dolžina regalnega skladišča	68,94	[m]
L_{SC}	Skupna dolžina regalnega skladišča	74,94	[m]
b_{20}	Dodatek na koncu regalnega skladišča	3	[m]
N_x	Št. regalnih oken v vodoravni smeri	80	[-]

» Preglednica 3: Dimenzije skladiščnega regala

Model regeneracije energije pri zaviranju vožnje regalnega dvigala v vodoravni smeri in pri spuščanju dvizne mize z bremenom v navpični smeri

Predlagani model se navezuje na regalno dvigalo z dvizno mizo za težje tovore, ki se nahaja v prilagojenih kasetah za jeklene palice in profile.

Regalno dvigalo ima tri neodvisne pogone, in sicer:

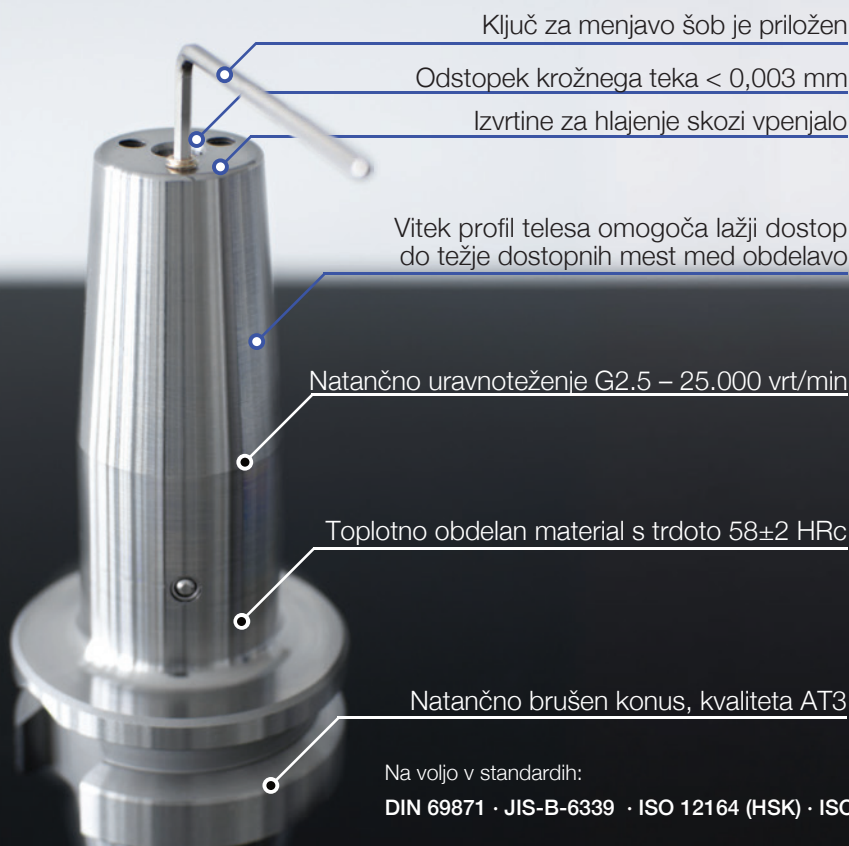
- pogon za vožnjo regalnega dvigala v vodoravni smeri;
- pogon za pomik dvizne mize v navpični smeri;
- pogon mehanizma za uskladiščenje/odpremo kasete v/iz regalnega okna skladiščnega regala.

Ker se največji prispevki regeneracije energije pojavljajo pri zaviranju regalnega dvigala v vodoravni smeri in pri spuščanju dvizne mize v navpični smeri, bomo v nadaljevanju upoštevali le navedena pogona.

SAB



P. Preradovića 110
Daruvar - Hrvaška
sab@sab.hr / www.sab.hr

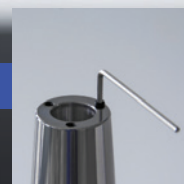


3-v-1 THERMO Orodna držala za nakrčevanje

3 načini hlajenja hkrati

Zaprte izvrtine

Hlajenje skozi orodje



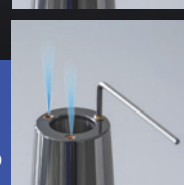
Brez šob

Širok curek hladilne tekočine iz vpenjala



Visokohitrostne šobe

Ozek curek hladilne tekočine iz vpenjala za visokohitrostno obdelavo



Predpostavke in omejitve

Osnovne predpostavke in omejitve naše raziskave so:

1. Regalno dvigalo lahko odlaga kasete na obeh straneh skladiščnega regala (levo in desno).
2. Upoštevali smo dvojni delovni cikel (angl. Double command, DC), ki se navezuje na uskladiščenje in odpremo kasete v zaključenem krogu.
3. Znane so geometrijske vrednosti skladišča in skladiščne osno-ve (kasete).
4. Znane so kinematične vrednosti regalnega dvigala v_x , a_x in dvižne mize v_y , a_y .
5. Upoštevam, da med spustom dvižne mize regalnega dvigala brez regeneracije ne trošimo energije (zaviranje z zavornim kolutom).
6. Vhodno/izhodna lokacija se nahaja na vhodu v regalno skladišče na prvi etaži.
7. Upoštevana je možnost, da regalno dvigalo in dvižna miza regalnega dvigala ne dosežeta maks. hitrosti v vodoravni in navpični smeri.
8. Upoštevana je naključna skladiščna strategija uskladiščenja in odpreme kasete, kar pomeni, da je izbira vsake lokacije za uskladiščenje ali odpremo enako verjetna.
9. Poznana je nosilnost regalnega dvigala. Privzeto je, da so vse kasete zapolnjene z 85-odstotnim masnim deležem, kar pomeni, da bo masa transportiranega materiala znašala $0,85 \cdot m_{t, cel}$.
10. Predvideno je, da pogonski elektromotorji z pripadajočimi prenosni nimajo 100-odstotnega izkoristka. Upoštevana sta torej izkoristka η_x in η_y .
11. Predpostavljamo sta ročici tornega momenta jeklo-jeklo in jeklo-polimer f_x in f_y pri kolesih regalnega dvigala in dvižne mize.

V raziskavi smo upoštevali dvojni delovni cikel (DC), ki je učinkovitejši, kot je enojni delovni cikel (angl. Single command cycle, SC).

V nadaljevanju je predstavljen cikel uskladiščenja in odpreme znotraj dvojnega delovnega cikla.

Cikel uskladiščenja:

- Dvižna miza regalnega dvigala se nahaja na vhodno-izhodni lokaciji v prvi etaži, kjer z valjčnega transporterja pobere transportno skladiščno enoto (kaseto z jeklenimi palicami in profili).
- Po prevzemu kasete se regalno dvigalo z dvižno mizo premika sočasno v vodoravni (x) in v navpični (y) smeri proti izbrani skladiščni lokaciji.
- Ko regalno dvigalo z dvižno mizo doseže izbrano skladiščno lokacijo, se izvede proces uskladiščenja kasete v skladiščni regal.

Cikel odpreme:

- Dvižna miza regalnega dvigala se nahaja ob znani lokaciji uskladiščenja kasete v skladiščnem regalu.
- Glede na izbrano odpremno lokacijo se regalno dvigalo z dvižno mizo premika sočasno v vodoravni (x) in v navpični (y) smeri proti izbrani odpremni lokaciji.
- Ko regalno dvigalo z dvižno mizo doseže izbrano odpremno lokacijo, se izvede proces odpreme kasete iz skladiščnega regala.
- Po prevzemu kasete iz skladiščnega regala se regalno dvigalo z dvižno mizo premika sočasno v vodoravni (x) in v navpični (y) smeri proti vhodno-izhodni lokaciji.
- Ko regalno dvigalo z dvižno mizo doseže vhodno-izhodno lokacijo, se izvede odprema kasete na valjčni transporter.

$$T(DC) = 4t_{P/S} + t_{0/S} + t_{S/R} + t_{R/0} \tag{1}$$

Čas dvojnega delovnega cikla izračunamo po naslednji enačbi:

Pri tem je $t_{P/S}$ čas manipulacije. Čas gibanja je sestavljen iz vožnje regalnega dvigala proti izbrani odpremni lokaciji $t_{0/S}$, vožnje proti izbrani prevzemni lokaciji $t_{S/R}$ in vožnje proti izhodiščni legi regalnega dvigala $t_{R/0}$.

Iz izračunanega časa lahko po naslednji enačbi izračunamo pre- točno (urno) zmogljivost dvojnega delovnega cikla:

$$\lambda(DC) = 2 \cdot \left(\frac{3600}{T(DC)} \right) \tag{2}$$

Računski model za določitev regeneracije energije pri zaviranju regalnega dvigala v vodoravni smeri in pri spuščanju dvižne mize v navpični smeri

Pri računskem modelu za določitev regeneracije energije pri zaviranju regalnega dvigala v vodoravni smeri in pri spuščanju dvižne mize v navpični smeri smo uporabili računske izraze iz znanstvenega članka avtorjev (Jerma n idr., 2017).

V tem članku bomo upoštevali možnost regeneracije energije v obeh smereh gibanja.

Energija, ki jo med delom porabi regalno dvigalo z dvižno mizo, je sestavljena iz vsote posameznih prispevkov dodajanja in odvzemanja energije v sistem in izgub, ki nastajajo pri tem.

Delo, ki je potrebno za pospešitev regalnega dvigala na zahtevano hitrost v vodoravni smeri, lahko zapišemo s pomočjo naslednje enačbe:

$$A_{x, kin} = m_{cel} \cdot \frac{v_{x, max}^2}{2} \cdot \frac{1}{\eta_x} \tag{3}$$

kjer je m_{cel} celotna masa regalnega dvigala s tovorom. Med delovnim ciklom jo lahko zapišemo kot:

$$m_{cel} = m_k + m_p + m_t \tag{4}$$

Pri deležu vožnje praznega regalnega dvigala med lokacijo uskladiščenja in odpreme, mase TSE ne upoštevam, zato tedaj enačbo preoblikujemo v naslednjo obliko:

$$m_{cel} = m_k + m_p \tag{5}$$

Upeljimo potrebno opravljeno pot s_x v vodoravni smeri. Pri tem lahko zapišemo odvisnost maksimalne hitrosti od prevožene poti v vodoravni smeri:

$$v_{x, max} = \left\{ \begin{array}{l} v_x \leftrightarrow s_x > \frac{v_x^2}{2 a_x} \\ \sqrt{a_x s_x} \leftrightarrow s_x < \frac{v_x^2}{2 a_x} \end{array} \right\} \tag{6}$$

V primeru zaviranja regalnega dvigala uporabimo sistem generatorskega zaviranja. Izkoristek regeneracije $\eta_{x, reg}$ zajema vse izgube energije med pretvorbo v električno energijo z izjemo kotalnega trenja, ki ga obravnavamo posebej. Zapišemo lahko:

$$A_{x, kin_reg} = m_{cel} \cdot \frac{v_{x, max}^2}{2} \cdot \eta_{x, reg} \tag{7}$$

Delo, ki je potrebno za premaganje kotalnega trenja na spodnjih kotalnih kolesih, lahko izrazimo s pomočjo naslednje enačbe:

$$A_{x, rol} = \frac{2g \cdot (m_{cel}) \cdot f_x \cdot s_x}{d_x \cdot \eta_x} \tag{8}$$

Podobno, kot je navedeno v delu avtorjev (Jerma n idr., 2017), smo tudi v našem članku privzeli, da je treba za premaganje kotalnega trenja, ki nastane na zgornjih vodilnih kolesih, upoštevati dodatnih 20 % dela, definiranega z enačbo (8). S tem lahko s seštevkom enačb (3), (7) in (8) izračunamo skupno energijsko stanje v vodoravni smeri.

$$A_x = A_{x,kin} + 1,2 \cdot A_{x,rol} + A_{x,kin_reg} \quad (9)$$

Podobno lahko opišemo energijsko stanje v navpični smeri. Delo, ki je potrebno za pospešitev dvižne mize regalnega dvigala na zahtevano hitrost v navpični smeri, lahko izrazimo z enačbo št. 10.

$$A_{y,kin} = m_{cel_y} \cdot \frac{v_{y,max}^2}{2} \cdot \frac{1}{\eta_y}, \quad (10)$$

kjer je m_{cel_y} celotna masa dvižne mize z maso TSE.

$$m_{cel_y} = m_p + m_t \quad (11)$$

Pri deležu prazne vožnje dvižne mize regalnega dvigala med lokacijo uskladiščenja in odpreme mase TSE ne upoštevamo, zato lahko enačbo 11 preoblikujemo v naslednjo obliko:

$$m_{cel_y} = m_p \quad (12)$$

Vpeljimo potrebno opravljeno pot s_y v navpični smeri. Pri tem lahko zapišemo odvisnost maksimalne hitrosti od prevožene poti.

$$v_{y,max} = \begin{cases} v_y \leftrightarrow & s_y > \frac{v_y^2}{2 a_y} \\ \sqrt{a_y s_y} \leftrightarrow & s_y < \frac{v_y^2}{2 a_y} \end{cases} \quad (13)$$

Pri dvigu dvižne mize regalnega dvigala skupaj s TSE sistemom povišamo potencialno energijo, za kar porabimo delo, ki ga lahko izrazimo kot:

$$A_{y,p} = \frac{g \cdot (m_{cel_y}) \cdot s_y}{\eta_y} \quad (14)$$

Regeneracijo energije zaradi spuščanja dvižne mize v navpični smeri lahko izrazimo s pomočjo potencialne energije, kjer je delež regenerirane energije bistveno nižji od potencialne energije, ki je na voljo v sistemu.

Transformacijski proces lahko izrazimo kot:

$$A_{y,p_reg} = g \cdot (m_{cel_y}) \cdot s_y \cdot \eta_{y_reg} \quad (15)$$

Pri tem je η_{y_reg} izkoristek pri regeneraciji. Izkoristek zajema vse izgube energije med pretvorbo v električno energijo z izjemo kotalnega trenja, ki ga obravnavamo posebej. Konservativno je bil ocenjen na podlagi dela avtorjev (Jerman idr., 2017) in znaša $\eta_{y_reg}=50\%$.

Delo elektromotorjev, ki je potrebno za premagovanje kotalnega trenja v navpični smeri, lahko izrazimo kot:

$$A_{y,rol} = \frac{2g \cdot (m_{cel}) \cdot f_y \cdot s_y}{d_y \cdot \eta_y \cdot 10} \quad (16)$$

Privzeto je, da povprečno zgolj 10 % mase prispeva k normalni komponenti sile, navpično na vodila.

Numerična simulacija

Na osnovi predstavljenih vhodnih podatkov smo izdelali simulacijski model z uporabo programskega okolja MS Visual Studio in programskega jezika C#.

Simulacijski model je bil izdelan z namenom, da natančno in učinkovito posnema delovanje avtomatiziranega regalnega skladiščnega sistema z regalnimi dvigalom za težje tovore.

Olajšajte si delo pri obdelavi težko obdelovalnih materialov, z novimi Seco rezkalnimi ploščicami pravokotne oblike LP09, namenjene za rezkalne glave High Feed 2™.



ŽIVLJENJE JE ŽE TAKO DOVOLJ TEŽKO, VENDAR NAJ TUDI NE BO VAŠA STROJNA OBDELAVA.



Rezultati simulacijske analize

V nadaljevanju so zbrani rezultati simulacijske analize avtomatiziranega regalnega skladiščnega sistema z regalnim dvigalom za težje tovore za obdobje enega meseca. Pri analizi smo prevzeli 20 delovnih dni in delo v dveh izmenah. (Preglednica 5)

Iz simulacijske analize lahko vidimo, da ima največji vpliv na porabo energije dvig dvižne mize regalnega dvigala skupaj s TSE, ki rezultira v vrednosti potencialne energije $\Sigma A_p = 7032$ MJ. Podobno se pri odpremi v dvojnem ciklu, kjer regalno dvigalo ne začne delovnega cikla iz referenčne točke skladišča, regenerira največji delež energije. Pri spustu materiala s platformo se namreč pridobi večji delež energije, kot je izgub zaradi vodoravnega gibanja regalnega dvigala $\Sigma A_{odpremi} = -1581,4$ MJ.

m_k	Masa konstrukcije dvigala	7800	[kg]
m_p	Masa dvižne ploščadi	1000	[kg]
m_{t_cel}	Dvižna zmogljivost	4000	[kg]
m_t	Povprečna masa transportno skladiščne enote	$0,85 m_{t_cel} = 3400$	[kg]
v_x	Končna hitrost v vodoravni smeri	1,67	[m/s]
v_y	Končna hitrost v navpični smeri	0,79	[m/s]
v_{y_poz}	Pozicijska hitrost v navpični smeri	0,1	[m/s]
v_e	Hitrost uskladičenja	0,5	[m/s]
a_x	Pospešek v vodoravni smeri	0,5	[m/s ²]
a_y	Pospešek v navpični smeri	0,6	[m/s ²]
g	Gravitacijski pospešek	9,81	[m/s ²]
η_x	Skupni izkoristek motorja z reduktorjem v vodoravni smeri	0,704	[-]
η_y	Skupni izkoristek motorja z reduktorjem v navpični smeri	0,628	[-]
η_{x_reg}	Izkoristek regeneracije v vodoravni smeri	0,3	[-]
η_{y_reg}	Izkoristek regeneracije v navpični smeri	0,5	[-]
d_x	Premer vodilnih koles v vodoravni smeri	0,3	[m]
d_y	Premer dvižnih vodilnih koles	0,15	[m]
f_x	Ročica tornega momenta jeklo - jeklo	0,0005	[m]
f_y	Ročica tornega momenta jeklo - polimer	0,001	[m]

» Preglednica 4: Vhodni podatki za izvedbo numerične simulacije

[MJ]	USKLADIŠČENJE	PRAZNI HOD	ODPREMA	Σ
$A_{x,kin}$	244,3	174,3	245,1	663,7
$A_{y,kin}$	22,7	2,5	-	25,2
ΣA_{kin}	267,1	176,8	245,1	688,9
$A_{x,rol}$	247,2	116,5	244,9	608,6
$A_{y,rol}$	8,8	1,3	8,6	18,6
ΣA_{rol}	256,0	117,7	253,6	627,3
$A_{y,p}$	6578,9	453,5	-	7032,4
ΣA_p	6578,9	453,5	-	7032,4
A_{y,p_reg}	0,0	150,9	2028,3	2179,2
A_{x,kin_reg}	51,3	36,8	51,8	139,9
ΣA_{por}	7102,0	747,9	498,6	8348,6
ΣA_{reg}	51,3	187,7	2080,1	2319,1
ΣA_{neto}	7050,7	560,2	-1581,4	6029,5

» Preglednica 5: Rezultati porabe električne in regenerirane energije

Energijsko stanje za pospeševanje in regeneracijo v vodoravni smeri je med tem kar nekaj razredov nižje. Energija, ki je potrebna za pospeševanje dvigala na predpisano hitrost, znaša $\Sigma A_{kin} = 688,9$ MJ.

Avtomatizirano regalno skladišče z regalnim dvigalom za težje tovore bi za mesečno obratovanje pri trenutno predpisanih pogojih porabilo $\Sigma A_{por} = 8348,6$ MJ, kar lahko s pretvornikom (0,2778) pretvorimo v 2319,2 kWh električne energije.

Celotni prihranki energije zaradi regeneracije pri zaviranju regalnega dvigala v vodoravni smeri in pri spuščanju dvižne mize v navpični smeri znašajo:

$$\Sigma A_{reg} = |\Sigma A_{y,p_reg}| + |\Sigma A_{x,kin_reg}| = 2319,1 \text{ MJ} \quad (17)$$

Prav tako lahko ugotovimo, da je regenerirana energija zaradi zaviranja regalnega dvigala v vodoravni smeri izrazito nižja v primerjavi s spuščanjem dvižne mize regalnega dvigala v navpični smeri.

Izračunamo lahko razmerje med deleži regenerirane energije v vodoravni in navpični smeri.

$$\tau_{pk} = \frac{|\Sigma A_{x,kin_reg}|}{|\Sigma A_{y,p_reg}|} = \frac{139,9}{2179,2} = 0,064 \quad (18)$$

Iz razmerja lahko opazimo, da je investicija v uporabo tehnologije regeneracije energije veliko bolj smotna z namestitvijo regeneracijskega sistema na dvižno mizo regalnega dvigala pri spuščanju v navpični smeri.

Iz vse porabljene energije in regenerirane energije lahko izračunamo delež skupne regeneracije, ki zajema zaviranje regalnega dvigala v vodoravni smeri in spuščanje dvižne mize regalnega dvigala v navpični smeri. Ta znaša 28 %.

$$\tau_{reg} = \frac{|\Sigma A_{reg}|}{\Sigma A_{por}} = \frac{2319,1}{8348,6} = 0,28 \quad (19)$$

Delež regenerirane energije, ki bi jo prihranili samo pri spuščanju dvižne mize regalnega dvigala v navpični smeri, znaša 26 %. Pri tem se zdi delež regenerirane energije, ki bi jo prihranili zgolj pri regeneraciji v vodoravni smeri, zanemarljiv, saj znaša manj kot 2 %.

$$\tau_{reg,y} = \frac{|\Sigma A_{y,p_reg}|}{\Sigma A_{por}} = \frac{2179,2}{8348,6} = 0,26 \quad (20)$$

$$\tau_{reg,x} = \frac{|\Sigma A_{x,kin_reg}|}{\Sigma A_{por}} = \frac{139,9}{8348,6} = 0,016 \quad (21)$$

Poraba energije je torej odvisna od številnih spremenljivk, kot so mere skladišča, kinematične omejitve in izkoristki regalnega dvigala. V našem sistemu se je pokazalo, da je prispevek regenerirane energije, ki jo porabimo v navpični smeri bistveno večji od prispevka energije, ki zagotavlja vožnjo regalnega dvigala v vodoravni smeri.

Zaključek

V okviru članka smo proučili možnost uporabe regeneracije energije pri obratovanju avtomatiziranih regalnih skladiščnih sistemov v jeklarski industriji. Pozornost je bila namenjena raziskavi vpliva in pomena regeneracije energije pri doseganju ciljev trajnostnega ter učinkovitega skladiščenja. Cilj raziskave je bil proučiti možnosti regeneracije energije pri procesu uskladičenja in odpreme kaset jeklenih palic in profilov. Proizvodi in polproizvodi v jeklarski industriji so večjih osnovnih dimenzij in zaradi velike gostote materiala tudi izjemno težki. Obratovanje regalnih dvigal s proizvodi večjih dimenzij rezultira v relativno veliki porabi električne energije. Rezultati analize so pokazali, da uporaba

principa regeneracije energije v avtomatiziranih regalnih skladiščnih sistemih za izrazito težke tovore omogoča prihranke energije. Med zaustavljanjem oz. zaviranjem regalnega dvigala in spusta dvizne mize regalnega dvigala se del kinetične in potencialne energije preko generatorja pretvori v električno energijo. Sistem regeneracije energije nima zgolj neposredne stroškovne prednosti, ampak tudi druge prednosti. Pomemben dejavnik je tako tudi vpliv na okolje in na t. i. "toplotno onesnaženje". Ko je v proces vključena regeneracija, se namreč opazno manjši del energije pretvori v nekoristno toploto. Regenerirano energijo lahko ob pravilnem upravljanju pošljemo nazaj v omrežje, s čimer se lahko uravnoteži lokalna poraba energije. Prav tako zmanjšamo potrebo po visoko zmogljivi električni infrastrukturi, ki je bistvena za doseganje visokozmogljivih skladiščnih sistemov. Iz rezultatov analize je razvidno, da je uporaba regeneracije energije med delovanjem avtomatiziranih skladišč za izrazito težke tovore smiselna in učinkovita. Glede na primer avtomatiziranega regalnega skladišča za izrazito težke tovore, prikazanega v članku lahko pridobimo cca. 30 % energije. Smotrnost uporabe sistema regeneracije energije je seveda odvisna tudi od drugih dejavnikov, kot je nabavna vrednost sistema regeneracije in zakupljene cene električne energije, ki v zadnjem času izrazito narašča. Trajnostno usmerjen pristop z uporabo regeneracije energije prispeva k zmanjšanju porabe energije in s tem k bolj ekonomičnemu in okolju prijaznemu delovanju skladišča. Prihodnje raziskave in uvajanje konceptov regeneracije energije bi bili korak naprej k bolj trajnostni industrijski proizvodnji.

(So)financiranje raziskave

Raziskava v tem članku je bila podprta s strani javne Agencije za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije (ARRS) v okviru aplikativnega raziskovalnega projekta »Skladiščenje 4.0 – Model integracije skladiščno-komisio-nirnih in robotskih sistemov«; številka projekta L5-2626.

Literatura

- [12] Bortolini, M., Faccio, M., Ferrari, E., Gamberi, M., & Pilati, F. (2017). Time and energy optimal unit-load assignment for automatic S/R warehouses. *International Journal of Production Economics*, 190, 133–145. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2016.07.024>
- [13] Hot rolled long steel worldwide production by region. (b. d.). Statista. Pridobljeno 3. avgust 2023, s <https://www.statista.com/statistics/863745/global-production-hot-rolled-long-steel-product-by-region/>
- [14] Jerman, B., Zrnič, Nenad, Jenko, M., & Lerher, T. (2017). Energy regeneration in automated high bay warehouse with stacker cranes. *Tehnicki Vjesnik - Technical Gazette*, 24(5). <https://doi.org/10.17559/TV-20161219112306>
- [15] Kim, K. H., & Hong, G.-P. (2006). A heuristic rule for relocating blocks. *Computers & Operations Research*, 33(4), 940–954. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2004.08.005>
- [16] Lerher, T., Hliš, T., Marolt, J., Rupnik, B., & Kovačič, M. (2019). Design of automated warehouse for long and heavy load steel bars. *XXIII International Conference MHCL 2019*, 2019, 245–250.
- [17] Marolt, J., & Lerher, T. (2018). Comparison of Lowest-Slot and Nearest-Stack Heuristics for Storage Assignment of Steel Bar Sets. *Logistics & Sustainable Transport*, 9(2), 37–45. <https://doi.org/10.2478/jlst-2018-0008>
- [18] Maschietto, G. N., Ouazene, Y., Ravetti, M. G., de Souza, M. C., & Yalaoui, F. (2016). Scheduling cranes to retrieve steel coils in a warehouse. *IFAC-PapersOnLine*, 49(12), 1020–1025.

TECOS

RAZVOJNI CENTER ORODJARSTVA SLOVENIJE



NAŠE PREDNOSTI:

- tehnološko znanje na temo orodjarstva in izdelovalnih tehnologij,
- lastna oprema,
- vrhunski strokovnjaki z več kot 25 letnimi izkušnjami,
- najsodobnejša znanja in lastne raziskave,
- odličnost in celovite rešitve.



NOVOST:

Dodatna poklicna kvalifikacija

BRIZGALEC PLASTIČNIH MAS

- dopolnjuje usposobljenost posameznika (zaposlenega) na področju predelave polimernih materialov,
- temelji na zahtevah trga s preišljeno izbranimi tematikami in učnimi pristopi.
- VEČ INFORMACIJ: spela.bordon@tecos.si



USPOSABLJANJA PO MERI INDUSTRIJE:

- tematska usposabljanja,
- individualni ali skupinski coachingi,
- sklopi usposabljanj po meri naročnika.

TECOS, Kidričeva ulica 25, SI-3000 Celje
T: 03 490 09 20, 041 896 742
spela.bordon@tecos.si, www.tecos.si

- <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.07.576>
- [19] Meneghetti, A., & Monti, L. (2011). Energy Efficient Dual Command Cycles in Automated Storage and Retrieval Systems. 1668–1675. <https://doi.org/10.3384/ecp110571668>
- [20] Meneghetti, A., & Monti, L. (2013a). How Energy Recovery Can Reshape Storage Assignment in Automated Warehouses. V C. Emmanouilidis, M. Taisch, & D. Kiritsis (Ur.), *Advances in Production Management Systems. Competitive Manufacturing for Innovative Products and Services* (str. 33–40). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-40352-1_5
- [21] Meneghetti, A., & Monti, L. (2013b). Multiple-weight unit load storage assignment strategies for energy-efficient automated warehouses. *International Journal of Logistics*, 2013.
- [22] Nagasawa, I., Takanashi, K., & Tohyama, I. (1975). Automated Warehouse for the Steel Industry. *IFAC Proceedings Volumes*, 8(1, Part 3), 51–59. [https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)67535-9](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)67535-9)
- [23] Rajković, M., Zrnic, N., Kosanić, N., Borovinšek, M., & Lerher, T. (2017). A Multi-objective optimization model for minimizing cost, travel time and CO₂ emission in an AS/RS. *FME Transaction*, 45, 620–629. <https://doi.org/10.5937/fmet1704620R>
- [24] Rushton, A., Croucher, P., & Baker, P. (2014). *The handbook of logistics & distribution management* (5th edition). Kogan Page.
- [25] Stock photos, royalty-free images, graphics, vectors & videos. (b. d.). Adobe Stock. Pridobljeno 3. avgust 2023, s <https://stock.adobe.com/>
- [26] Šourek, D., & Seidlova, A. (b. d.). Design of warehouse for material, which is non-uniform and difficult to handle.
- [27] Tang, L., Liu, J., Rong, A., & Yang, Z. (2002). Modelling and a genetic algorithm solution for the slab stack shuffling problem when implementing steel rolling schedules. *International Journal of Production Research*, 40(7), 1583–1595. <https://doi.org/10.1080/00207540110110118424>
- [28] Tang, L., Zhao, R., & Liu, J. (2012). Models and algorithms for shuffling problems in steel plants. *Naval Research Logistics* (NRL), 59(7), 502–524. <https://doi.org/10.1002/nav.21503>
- [29] VDI 4418—Automated storage systems for long and flat-shaped goods. (2000). <https://www.vdi.de/richtlinien/details/vdi-4418-automated-storage-systems-for-long-and-flat-shaped-goods>
- [30] Wan, Y., Liu, J., & Tsai, P.-C. (2009). The assignment of storage locations to containers for a container stack: The Assignment of Storage Locations to Containers. *Naval Research Logistics* (NRL), 56(8), 699–713. <https://doi.org/10.1002/nav.20373>
- [31] Xie, X., Zheng, Y., & Li, Y. (2014). Multi-crane scheduling in steel coil warehouse. *Expert Systems with Applications*, 41(6), 2874–2885. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2013.10.022>
- [32] Yuan, Y., & Tang, L. (2017). Novel time-space network flow formulation and approximate dynamic programming approach for the crane scheduling in a coil warehouse. *European Journal of Operational Research*, 262(2), 424–437. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.03.007>
- [33] Zäpfel, G., & Wasner, M. (2006). Warehouse sequencing in the steel supply chain as a generalized job shop model. *International Journal of Production Economics*, 104(2), 482–501. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2004.10.005>
- [34] Zhao, R., & Tang, L. (2010). Integer programming model and dynamic programming based heuristic algorithm for the heavy plate shuffling problem in the Iron and steel industry. 2010 International Conference on Logistics Systems and Intelligent Management (ICLSIM), 1381–1385. <https://doi.org/10.1109/ICLSIM.2010.5461192>
- [35] Zhou, G., & Mao, L. (2010). Design and Simulation of Storage Location Optimization Module in AS/RS Based on FLEXSIM. *International Journal of Intelligent Systems and Applications*, 2(2), 33–40. <https://doi.org/10.5815/ijisa.2010.02.05>

Projekt »Delavnice s humanoidnimi roboti NAO«: Roboti povezujejo in izobražujejo

» V avgustu smo v Katapultu izvedli dvodnevo delavnico s humanoidnimi roboti NAO.

Delavnica s humanoidnimi roboti NAO je zasnovana tako, da spodbuja kreativnost, timsko delo in reševanje problemov ter udeležencem omogoča pridobivanje praktičnih izkušenj z robotiko.

Udeleženci na delavnici spoznajo osnovne principe robotike in umetne inteligence, vključno z gibanjem, zaznavanjem okolice, prepoznavanjem glasu in obrazov ter komunikacijo s človekom. S pomočjo enostavnih orodij za programiranje, kot je na primer grafični programski vmesnik Choregraphe, udeleženci kreirajo lastne interaktivne scenarije, v katerih robot NAO izvaja različne naloge. Udeleženci delavnic pridobijo vpogled v svet robotike ter pridobijo temeljno znanje za nadaljnje raziskovanje in ustvarjanje na tem hitro razvijajočem se področju. Primerno za osnovnošolske otroke II. triade (4., 5., 6. razred) in III. triade (7., 8., 9. razred).

Projekt »Delavnica s humanoidnimi roboti NAO« temelji na ideji

izobraževanja in povezovanja na področju robotike. Cilj projekta je zagotoviti otrokom priložnost, da spoznajo in se naučijo o robotiki. Roboti NAO so izjemni pripomočki, ki združujejo napredno tehnologijo in interaktivnost ter predstavljajo idealen način, kako otroke pritegniti k znanju s področja robotike in umetne inteligence.

Izobraževalne ustanove (Fakulteta za strojništvo Maribor, Šolski Center Celje, Mreža centrov raziskovalnih umetnosti in kulture – DDT, Katapult Robotika), ki se ukvarjajo s področjem izobraževanja mladine, so z veseljem prispevale svoje robote NAO za ta projekt. Skupaj organiziramo serije izobraževalnih delavnic, ki bodo potekale na različnih lokacijah, tako da bodo lahko otroci