



ANALIZA OKOLJSKIH IN EKONOMSKIH VPLIVOV MINERALIZIRANEGA LESA NA PRIMERU PLEČNIKOVE KLOPCE Z UPORABO LCA IN LCC METODOLOGIJE

ANALYSIS OF THE ENVIRONMENTAL AND ECONOMIC IMPACTS OF A PLEČNIK BENCH MADE OF MINERALIZED WOOD USING LCA AND LCC METHODOLOGY

Katarina Remic^{1*}, Matej Jošt¹, Matic Sitar^{1,2}

UDK članka: 684.433:502.175

Izvirni znanstveni članek / Original scientific article

Prispelo / Received: 20.9.2023

Sprejeto / Accepted: 19.10.2023

Izvleček / Abstract

Izvleček: Les je v krožnem biogospodarstvu prepoznan kot obetavna surovina, saj ima sposobnost skladiščenja ogljika, ki pa je pogojena z življenjsko dobo izdelka. Podaljšanje življenjske dobe lesa lahko dosežemo z ustrezno zaščito, pogosto z uporabo kemikalij, ki so lahko okolju in ljudem nevarne. Mineralizacija lesa s hidroksiapatitom predstavlja potencial za okolju prijazno zaščito lesa. Na primeru Plečnikove parkovne klopce, mineralizirane s hidroksiapatitom, sta bili izvedeni LCA in LCC analizi. Analiza LCA je temeljila na standardih EN ISO 14040 in EN ISO 14044, analiza LCC je bila prilagojena po vmesniku Evropske komisije za javna naročila. Pri primerjavi mineraliziranega lesa z življenjsko dobo 16 oz. 24 let z referenčnim (nemineraliziranim) lesom so rezultati pokazali, da je mineraliziran les z življenjsko dobo 24 let okolju najprijaznejša in hkrati najcenejša izbira. Največje negativne vplive na okolje je predstavljal mineraliziran les z življenjsko dobo 16 let, najdražja alternativa je bil referenčni les.

Ključne besede: analiza življenjskega cikla, hidroksiapatit, LCA, mineraliziran les, vplivi na okolje

Abstract: Wood is considered a promising raw material for the circular bioeconomy and has the ability to store biogenic carbon, and this is one reason why we want to extend the service life of wood. Toxic chemicals are often used for wood preservation, but hydroxyapatite seems to be an environmentally friendly solution for wood mineralization. LCA and LCC analyses were performed on a case study of a Plečnik bench, comparing mineralized wood with a service life of 16 and 24 years to a non-mineralized reference variant. LCA was based on EN ISO 14040 and EN ISO 14044, while LCC was adapted from the European Commission's LCC tool for public procurement. When comparing the results, mineralized wood with a service life of 24 years proved to be the most environmentally friendly and cost-effective option. The mineralized wood with a service life of 16 years had the greatest negative environmental impact, while the most expensive option was the reference wood.

Keywords: life cycle assessment, hydroxyapatite, LCA, mineralized wood, environmental impacts

1 UVOD

1 INTRODUCTION

Onesnaževanje okolja in čezmerno izkoriščanje naravnih virov še nikoli ni bilo tako intenzivno kot v zadnjih desetletjih. Posledično se družba spopada s socialnimi in podnebnimi krizami različnih razsežnosti (Implementacija ciljev trajnostnega razvoja, 2020). Kot obetavna surovina za premagovanje težav, s katerimi se sooča človeštvo, je bil, tudi v okviru ciljev trajnostnega razvoja, prepoznan les.

Lignocelulozni materiali predstavljajo potencial za trajnostno naravnano industrijo z dodano vrednostjo, omogočajo zmanjševanje globalne odvisnosti od fosilnih goriv in so cenjeni zaradi svoje sposobnosti skladiščenja ogljika (Kraigher et al., 2023). Ravno zaradi ogljika, vezanega v les, želimo lesu podaljšati življenjsko dobo in omogočiti čim več funkcij uporabe pred funkcijo pridobivanja energije-sežigom. Kljub cilju vzpostavitve krožno naravnane lesne industrije in promociji kaskadne rabe lesa je

¹ Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo, Jamnikarjeva 101, 1000 Ljubljana, Slovenija,

² Zavod za gradbeništvo Slovenije, Dimičeva ulica 12, 1000 Ljubljana, Slovenija

* e-mail: katarina.remic@bf.uni-lj.si

treba upoštevati, da je življenjska doba lesa pogojena tudi z naravno odpornostjo lesa (Humar et al., 2020) in scenariji ponovne uporabe lesa za različne funkcije mnogokrat niso mogoči.

Pri uporabi lesa na prostem lahko do neke mere lesu podaljšamo življenjsko dobo z uporabo konstrukcijskih rešitev, ki les varujejo pred vremenskimi vplivi. Običajno moramo uporabiti tudi modifikacijo lesa in/ali zaščito z biocidnimi sredstvi (Humar et al., 2020). Procesji zaščite lesa so lahko energetsko intenzivni in velikokrat vključujejo okolju in človeku nevarne kemikalije (Archer et al., 2006). Vplive na okolje, ki jih kratkoročno in dolgoročno povzročajo posamezni procesji zaščite, je zato smiselno preverjati in po potrebi regulirati. Kot učinkovita metoda za ugotavljanje okoljskega odnosa se je izkazala analiza življenjskega cikla (LCA), ki omogoča preučitev raznovrstnih vplivov na okolje v celotnem življenjskem ciklu in predstavlja celosten vpogled v prednosti in pomanjkljivosti procesov in izdelkov (Sinkko et al., 2023). Dias et al. (2022) so z uporabo LCA analizirali kombinacije površinske obdelave (insekticid + fungicid) in/ali vakuumске impregnacije (biocid na vodni osnovi) na kriptomeriji, smreki, boru in evkaliptusu. Kot pomemben dejavnik pri končnih rezultatih se je izkazala naravna odpornost lesa. Kategorije vplivov, ki so najbolj izstopale v rezultatih analize, so bile ekotoksičnost sladkih voda in rakotvorni vplivi na človekovo zdravje. Ugotovljeno je bilo tudi, da se okoljska učinkovitost v primerih uporabe površinskih premazov bistveno izboljšuje z zmanjševanjem frekvence obnavljanja premaza. Raziskave (Hill et al., 2021; Kuka et al., 2022; Candelier & Dibdiakova, 2021; Buryova & Sedlak, 2021) so z uporabo LCA preučevale vplive termične modifikacije lesa na okolje. Obravnavana je bila termična modifikacija kot samostojna vrsta zaščite lesa ali kot kombinacija s površinskimi premazi oz. sredstvi za impregnacijo (npr. bakrovimi pripravki). Modificiran les se je znotraj življenjskega cikla še posebej pozitivno izkazal v fazi uporabe (30 let). Faza impregnacije in/ali površinske obdelave z ostalimi sredstvi se je izkazala kot kritična v kategorijah ekotoksičnosti sladkih voda in toksičnih vplivih na človekovo zdravje (rakotvorni in nerakotvorni vplivi). Pri proučevanju vplivov lesene terase, impregnirane z bakrovim pripravkom (Bolin & Smith, 2011), je bilo ugotovljeno, da količina vplivov celotnega življenjskega cikla terase z večdesetletno

življenjsko dobo predstavlja zanemarljivo količino vplivov v primerjavi z vplivi gospodinjstva, ustvarjenimi zgolj v enem letu. V svojih raziskavah so Bolin in Smith (2011) ter Hu et al. (2023) z uporabo LCA ugotavljali tudi vplive na okolje pri zaščiti lesa z borovim pripravkom. Ugotovljeni so bili reprezentativno majhni vplivi na okolje, predvsem v kombinaciji bora s tanini, ki predstavljajo naravno zaščito lesa. Montazeri in Eckelman (2018) sta analizirala vplive na okolje različnih površinskih premazov na naravni osnovi oz. premazov, katerih večinski delež sestave ne predstavljajo sintetične spojine. Pomembna ugotovitev je bila, da delež naravnih komponent ne predstavlja nujno okolju bolj prijazne rešitve, ko upoštevamo celotni življenjski cikel.

Ker je v industriji velikokrat odločujoč dejavnik izbora cena izdelka oz. storitve, je kot podpora analizi LCA smiselna in pogosto uporabljena tudi analiza stroškov življenjskega cikla (LCC), ki upošteva vse stroške med celotnim življenjskim ciklom izdelka (stroški investicije, stroški vzdrževanja, stroški delovanja, stroški amortizacije itd.) (Sesana & Salvalai, 2013). Za doseganje optimalnih okoljskih in socialnih rezultatov je ključnega pomena, da se analize življenjskih ciklov združujejo in izdelek oz. storitev obravnavajo iz najrazličnejših zornih kotov. V tej raziskavi sta bili izvedeni poenostavljena analiza LCA in analiza LCC za les, mineraliziran s hidroksiapatitom (HAp). Ker je bila analiza LCA za sintezo hidroksiapatita že izvedena (Turk et al., 2017) in nakuže obetavno, okolju prijazno rešitev zaščite lesa, smo v raziskavi želeli raziskati okoljsko in ekonomsko učinkovitost uporabe mineraliziranega lesa na praktičnem primeru – v sistemu parkovne klopce.

2 MATERIAL IN METODE

2 MATERIALS AND METHODS

LCA analiza je bila izvedena v skladu s standardoma EN ISO 14040:2006 in EN ISO 14044:2006 ter priročnikom ILCD Handbook.

2.1 OPREDELITEV CILJEV IN OBSEGA

2.1 GOAL AND SCOPE DEFINITION

Namen analize LCA je oceniti vplive mineraliziranega bukovega lesa na okolje in jih primerjati z nemineralizirano različico. Analiza je bila izvedena na primeru sedišča in naslona Plečnikove klopc. Analizirana je bila zgolj faza uporabe znotraj ži-

vljenjskega cikla, ne pa tudi pridobivanje surovin, reciklaža, itd. Obe alternativni sta premazani z enim slojem 5 % raztopine montanskega voska. Mineralizirana bukovina je impregnirana s hidroksiapatitom (HAp). Določena funkcionalna enota izdelka je funkcija sedenja (zunanja uporaba) za 30 let. Upoštevali smo, da sedišče in naslon nista pod nobenimi pogoji izpostavljena stiku s tlemi. Glede na raziskave in poročila o življenjski dobi bukovine na prostem (Humar et al., 2015) je bila ocenjena življenjska doba bukovine, premazane z montanskim voskom, 8 let. Za mineraliziran les, premazan z montanskim voskom, je bila ocenjena življenjska doba 16 oziroma 24 let. Referenca je podana glede na potrebno vstopno količino lesa za sedišče in naslon. Glede na izkoristek lesa pri predelavi je treba v obravnavani sistem vnesti 0,22 m³ bukovine B kakovostnega razreda.

V analizi uporabljeni podatki so sekundarne narave in pridobljeni iz podatkovne baze Ecoinvent 3.9.1 ter obdelani s programsko opremo SimaPro 9.5.0.1. Omejitve sistema zajemajo (1) transport surovin do predelovalnega obrata; (2) obdelavo lesa; (3) impregnacijo in/ali površinsko obdelavo; (4) transport do montažne lokacije klopi; (5) vzdrževanje; (6) transport po končani življenjski dobi. Procesi so geografsko omejeni na področje Ljubljane, kar v nekaterih procesih, ki so vključeni v analizo, ključno vpliva na rezultate.

Vplivi analize življenjskega cikla (LCIA) so bili preračunani in ovrednoteni na podlagi metodologije ReCiPe 2016, ki emisije uvršča v Midpoint (H) kategorije ter jih nato združuje v kategorije Endpoint

(H), ki predstavljajo glavne indikatorje za ohranitev zdravja ljudi in ekosistemov. Midpoint kategorije vključujejo emisije drobnih delcev, radioaktivnost, tanjšanje stratosferske ozonske plasti, rakotvorne toksične vplive na človekovo zdravje, nerakotvorne toksične vplive na človekovo zdravje, segrevanje ozračja, rabo vode, ekotoksičnost sladkih voda, evtrofikacijo sladkih voda, evtrofikacijo morskih voda, ekotoksičnost zemlje, zakisovanje tal, rabo tal, ekotoksičnost morskih voda, izrabo mineralov in kovin, izrabo fosilnih goriv, troposferski ozon (vplivi na človeško zdravje) in troposferski ozon (vplivi na kopenske ekosisteme). Endpoint kategorije združujejo Midpoint kategorije v škodo, povzročeno človeškemu zdravju, škodo, povzročeno ekosistemom in okrnjenost surovin. Z normalizacijo rezultatov so bili le-ti preračunani na pomembnost negativnih vplivov posamezne kategorije za povprečnega prebivalca.

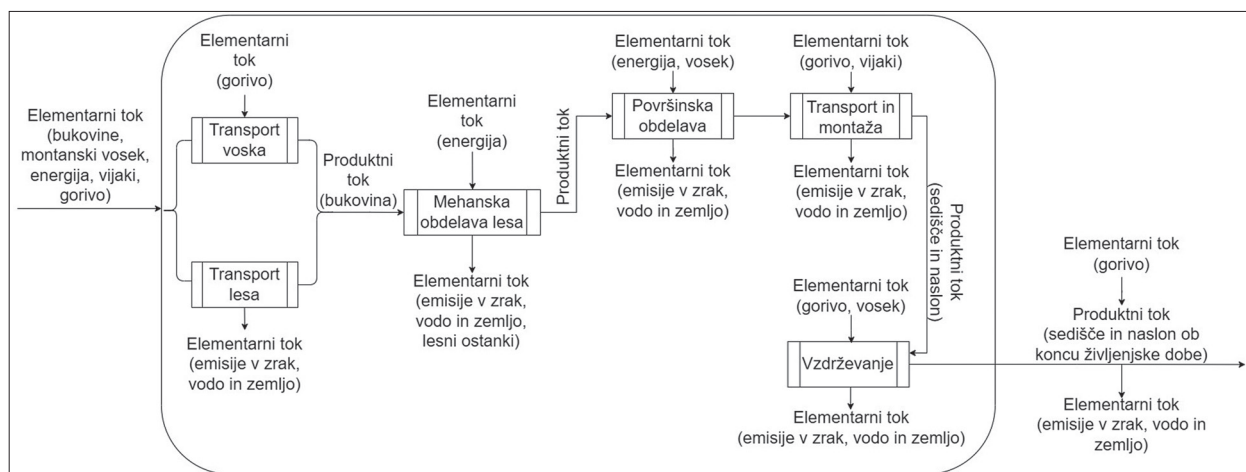
2.2 FAZA ANALIZE INVENTARJA (LCI)

2.2 LIFE CYCLE INVENTORY (LCI)

Omejitve sistema so tako za referenčni les, ki je premazan le z montanskim voskom (NATUR), kot tudi za mineralizirane alternative lesa, premazane z montanskim voskom (HAp16 in HAp24), prikazane v obliki diagrama na slikah 1 in 2.

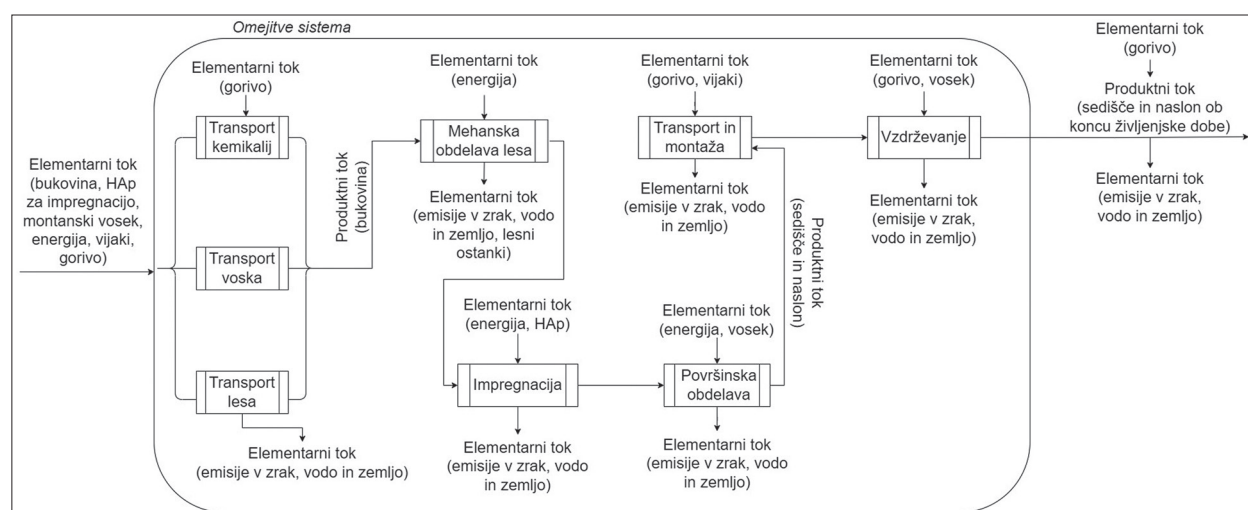
Analiza LCA zajema:

(1) Transport žaganega in skobljanega lesa od lokalne žage do proizvodnega obrata za izdelavo naslona in sedišča Plečnikove parkovne klopce (slika 3). Za izdelavo sedišča so bile v sistem vnesene tri letve dimenzij 10 cm × 12 cm × 4 m, za naslon



Slika 1. Diagram procesov za les 'NATUR'.

Figure 1. Process flow diagram for the variant 'NATUR'.



Slika 2. Diagram procesov za alternativni 'Hap16' in 'Hap24'.

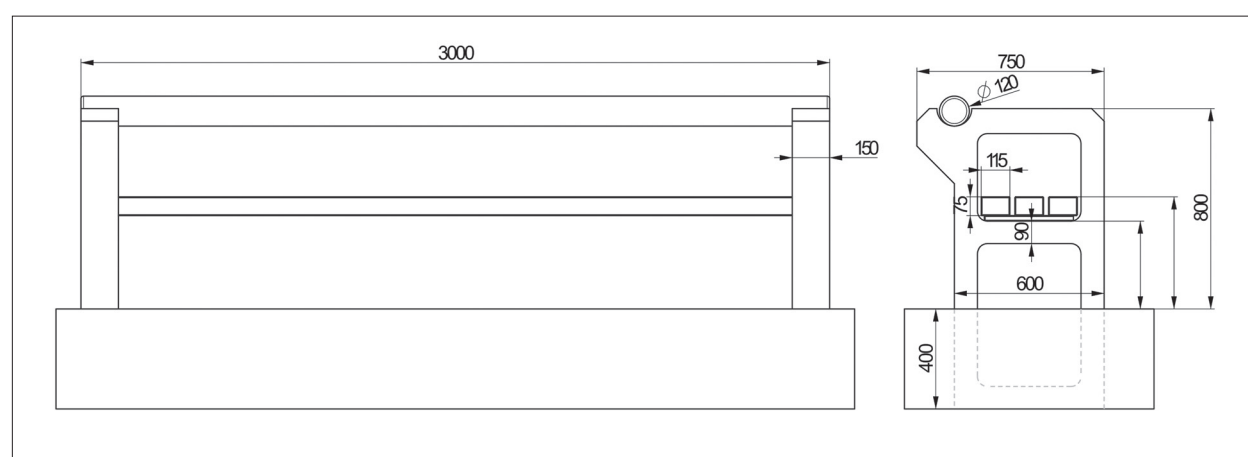
Figure 2. Process flow diagram for the variants 'Hap16' and 'Hap24'.

pa ena letev dimenzij 14 cm × 14 cm × 4 m. Les je bil predvidoma dobavljen s tovornim vozilom, zato smo iz podatkovne baze izbrali transport s tovornim vozilom EURO6 z največjo dovoljeno maso 7,5–16 ton. Dobavljen žagan les je bil sušen na 20 % ravnovesne vlažnosti. V podatkovni bazi smo izbrali rezan les listavcev ustrezne ravnovesne vlažnosti. V podatkovni bazi Ecoinvent je, glede na ravnovesno vlažnost lesa, energija, porabljena za sušenje v komercialni sušilni komori, že upoštevana. Za izbrano ravnovesno vlažnost lesa smo upoštevali gostoto bukovine 710 kg/m³ (Čufar et al., 2017);

(2) Transport kemikalij in voska od trgovine/distributerja do predelovalnega obrata. Dobava je bila izvedena z lahkim komercialnim vozilom;

(3) Mehansko obdelavo lesa, ki je zajemala rezanje in štiristransko poravnavo sedišča ter rezanje in struženje naslona. Za obdelavo sedišča in naslona je bil iz podatkovne baze poenostavljeno izbran proces štiristranske poravnave, ki predstavlja približek porabe energije za vse ostale procese;

(4) Impregnacijo v visokotlačni komori s HAP. Za preračune znotraj te faze je bil iz podatkovne baze uporabljen proces impregnacije lesa, ki vklju-



Slika 3. Tehnični načrt Plečnikove parkovne klopce (prirejeno po javnem razpisu Javnega holdinga Ljubljana za parkovno klop tip Plečnik).

Figure 3. Technical drawing of a Plečnik park bench (adapted from the public tender for a Plečnik-type park bench for the Javni holding Ljubljana).

čuje vse povprečne komercialne parametre in emisije;

(5) Nanos montanskega voska. Iz podatkovne baze je bil uporabljen proces nanosa površinskih sredstev s potapljanjem. Pri procesu potapljanja je vhodni parameter masa lesa, ker pa se po impregnaciji masa poveča za 20 %, smo nanos voska obravnavali ločeno za mineraliziran les in ločeno za referenčni les. Različno smo obravnavali tudi vse nadaljnje operacije, kjer masa vpliva na rezultate. Maso nanosenega voska smo v izračunih zanemarili;

(6) Transport do montažne lokacije in montažo z vijaki. Ker v podatkovni bazi ni parametra za vijake, smo uporabili poenostavljeno alternativo in v sistem vnesli zgolj parameter materiala (jeklo s pripadajočo maso za 12 vijakov M8, dolžine 100 mm);

(7) Vzdrževanje. Za referenčni les (NATUR) je bilo vzdrževanje predvideno enkrat v življenjski dobi, za les HAp16 je bilo vzdrževanje predvide-

no dvakrat v življenjski dobi, za HAp24 pa trikrat. Vzdrževanje zajema transport voska do montažne lokacije in porabo montanskega voska. Predpostavili smo, da se vosek pri vzdrževanju nanaša ročno s premazovanjem;

(8) Transport po končani življenjski dobi.

Podatkovna baza nima vnesenega parametra za HAp, zato je bil v naš sistem ročno vnesen material »HAp«, ki je bil poenostavljeno opisan kot skup (približek) materialov in procesov, definiranih v podatkovni bazi (kalcijev karbonat, etanojska kislina, voda, diamonijev fosfat in transport z lahkim komercialnim vozilom). Na enak način je bil opisan montanski vosek (voda, lignit in transport z lahkim komercialnim vozilom). Porabe energije delavcev in ostalih vhodnih parametrov, vezanih na delavce (transport do predelovalnega obrata, malica, itd.), v analizi nismo upoštevali. Za doseganje naše funkcionalne enote (30 let) moramo v sistem vnesti večkratne vrednosti emisij posameznih vrst lese-

Preglednica 1. Vrednosti vhodnih parametrov.

Table 1. Values of the input parameters.

Procesi in materiali / Processes and materials	Vrednost / Value	Vhodni parameter / Input parameter
Transport lesa / Wood transportation	20 km	3,16 tkm
Transport HAp / HAp transportation	13 km	0,21 tkm
Transport montanskega voska / Montan wax transportation	5 km	0,005 tkm
Žagan les, bukovina / Sawn wood, beech	-	0,22 m ³
Izdelava sedišča / Seating manufacturing	-	102,2 kg
Izdelava naslona / Backrest manufacturing	-	55,7 kg
HAp / Hap	-	16,33 kg
Impregnacija / Impregnation	-	81,65 kg
Montanski vosek (1x nanos) / Montan wax (1 coat)	4,63 m ² ; 200 g/m ²	0,93 kg
Nanos voska HAp / Application of montan wax to HAp treated wood	-	97,98 kg
Nanos voska NATUR / Application of montan wax	-	81,65 kg
Transport do montažne lokacije HAp / Transportation to the assembly site	5 km	0,49 tkm
Transport do montažne lokacije NATUR / Transportation to the assembly site for NATUR wood	5 km	0,41 tkm
Vijaki / Screws	12 kom	0,43 kg
Obnova voska / Recoating	4,63 m ² ; 200 g/m ²	0,93 kg
Transport po končani življenjski dobi HAp / Transportation at the end of service life for HAp wood	5 km	0,49 tkm
Transport po končani življenjski dobi NATUR / Transportation at the end of service life for NATUR wood	5 km	0,41 tkm

ne klopce glede na predvidene življenjske dobe. Obravnavani življenjski cikel se za les NATUR ponovi 3,75-krat, za HAp16 1,875-krat, za HAp24 pa 1,25-krat.

V preglednici 1 so predstavljeni kvantificirani vhodni parametri, ki so bili vneseni v izbrane procese znotraj obravnavanega sistema. Parametri so kvantificirani z maso oz. kot tonski kilometer, ki predstavlja prevoz 1 tone surovin na relaciji 1 km.

2.3 STROŠKOVNA OPREDELITEV

2.3 CHARACTERIZATION OF COSTS

Analiza stroškov življenjskega cikla (LCC) je bila izvedena na podlagi adaptacije vmesnika European Commission LCC tool (2019) za izračune specifičnih artiklov, ki so predmet javnih naročil, npr. računalnikov in monitorjev. Izračun zajema nabavne stroške, stroške vzdrževanja, stroške storitev, ostale stroške in stroške eksternalij. Stroški, vključeni v obravnavano LCC analizo, so prikazani v preglednici 2. Vsi stroški so prilagojeni stanju na trgu za leto 2023.

Za sušen žagan les je bila predvidena cena 400 €/m³ (Slovenski državni gozdovi, 2023; Tesarstvo Rutnik). Pri vseh storitvah transporta je bila upoštevana cena 1,5 €/km. Cena mehanske obdelave lesa zajema razrez lesa (4,2 €/m²), ploskovno poravnavo, formatiranje in brušenje sedišča (10,8 €/m²) ter struženje naslona (12 €/kos). Pri določitvi cene montaže je bilo upoštevano število privijačenih lesnih vijakov (0,5 €/kos). Na enak način je bila določena tudi cena demontaže – število izviženih vijakov (0,5 €/kos) (OZS, 2013). Upoštevana cena montanskega voska je bila 26,96 €/kg (Silva-produkt). Upoštevana cena vijakov je bila 0,7 €/kos (Vijaki.net). Predvidena cena impregnacije lesa s hidroksiapatitom je bila 1600 €/m³. Nabavne stroške predstavljajo stroški nabave lesa, vijakov, montanskega voska ter HAp. V LCC izračunu je bil strošek materiala HAp prištet k procesu impregnacije in obravnavan kot strošek storitve. Stroški vzdrževanja vključujejo dodatni montanski vosek, nanos voska ter transport do montažne lokacije. Impregnaci-

Preglednica 2. Cenovno ovrednoteni vhodni parametri glede na življenjsko dobo izdelka (ene klopi).

Table 2. Defined costs of input parameters based on the life of the product (one bench).

	NATUR [€]	HAp16 [€]	HAp24 [€]
Transport lesa / Wood transportation	30,00	30,00	30,00
Les / Wood	88,00	88,00	88,00
Transport HAp / HAp transportation	-	19,50	19,50
Impregnacija s HAp / Impregnation with HAp	-	184,00	184,00
Transport montanskega voska / Montan wax transportation	7,50	7,50	7,50
Montanski vosek / Montan wax	25,07	25,07	25,07
Površinska obdelava / Surface treatment	111,12	111,12	111,12
Mehanska obdelava lesa / Wood machining	35,95	35,95	35,95
Transport do montažne lokacije / Transportation to the assembly site	7,50	7,50	7,50
Vijaki / Screws	8,40	8,40	8,40
Montaža / Assembly process	6,00	6,00	6,00
Vzdrževanje / Maintenance	56,57	113,14	169,71
Demontaža / Dismantling	6,00	6,00	6,00
Transport po koncu življenjskega cikla / Transportation at the end of service life	7,50	7,50	7,50

ja, površinska obdelava, mehanska obdelava lesa, montaža in demontaža predstavljajo stroške storitev. Ostali stroški so vezani na Transporte materialov ter transport izdelka do montažne lokacije oz. transport po koncu življenjske dobe. V LCC izračunu so upoštevani še stroški eksternalij. V našem sistemu eksternalije predstavljajo socialne stroške onesnaževanja, ki so bili izračunani za področje Evrope (EU28) s programsko opremo SimaPro in metodologijo Environmental Prices.

3 REZULTATI

3 RESULTS

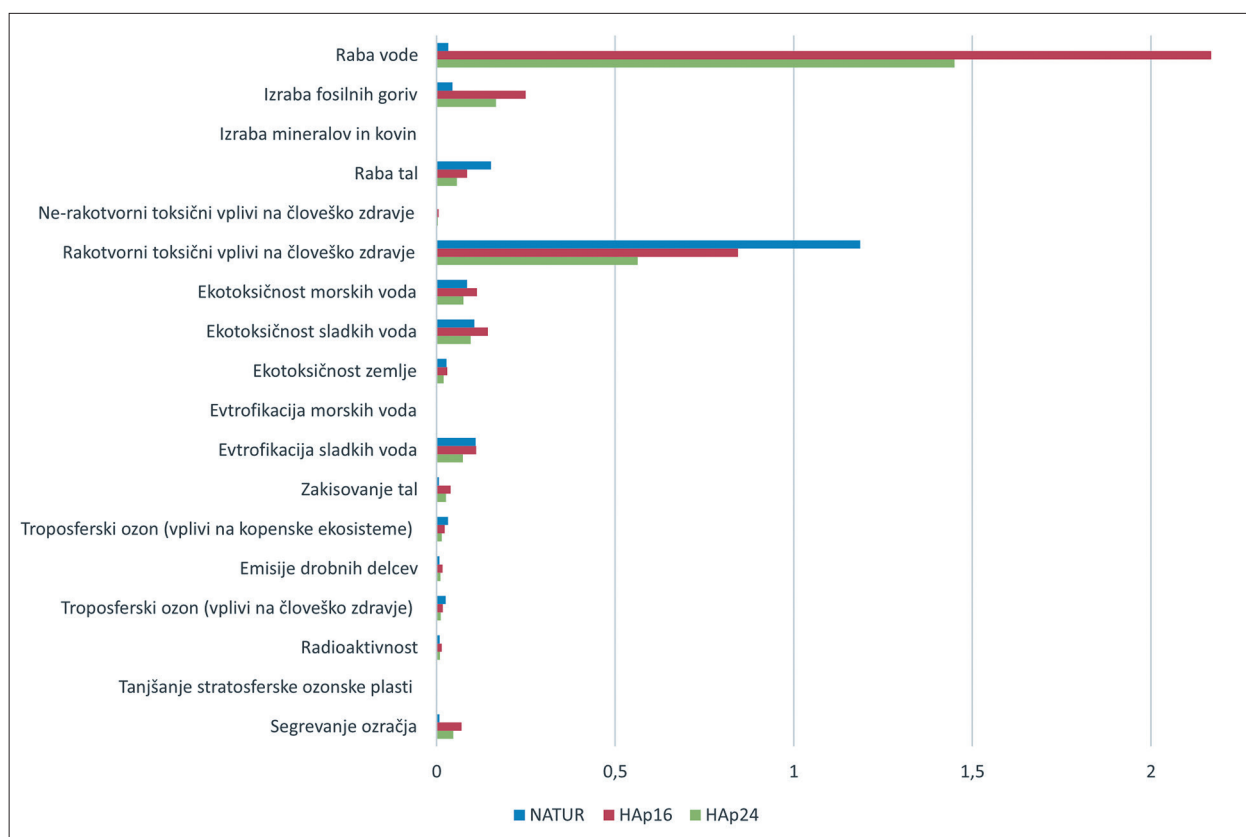
3.1 REZULTATI ANALIZE LCA (LCIA)

3.1 THE RESULTS OF LCA ANALYSIS (LCIA)

Vplivi kategorij Midpoint so večinoma najvišji za les HAp16, z izjemo rabe tal, tanjšanja stratosferske ozonske plasti, fotokemičnega smoga, eutrofikacije morskih voda in rakotvornih toksičnih vplivov na človekovo zdravje, kjer najvišje vplive dosega

les NATUR. Le-ta posebno nizke vrednosti vplivov dosega za klimatsko segrevanje, zakisovanje zemlje ter izrabo vode, mineralnih in fosilnih virov. Po normalizaciji rezultatov na globalno povprečnega prebivalca (slika 4), ki omogoča primerjavo kategorij s sicer različnimi enotami, je kot kategorija z najbolj problematičnimi vplivi izpostavljena kategorija rabe vode. Izpostavljeni so tudi rakotvorni toksični vplivi na človekovo zdravje. Največji vpliv na rabo vode ima proces impregnacije, na rakotvorne toksične vplive pa procesi mehanske obdelave lesa in uporaba jekla (vijakov) v sistemu.

Pri analizi Endpoint kategorij vplivov na okolje lahko ponovno vidimo, da so vplivi na okolje največji za HAp16. Močno negativno na kategorijo ekosistema vpliva tudi les NATUR. Pri normalizaciji Endpoint kategorij vplivov se kot daleč najbolj kritična kaže kategorija vplivov na človekovo zdravje (slika 5). Največ negativnih vplivov za človekovo zdravje nastane kot posledica procesa impregnacije.



Slika 4. Vplivi Midpoint kategorij po normalizaciji pri primerjavi alternativ 'NATUR', 'Hap16' in 'Hap24'.

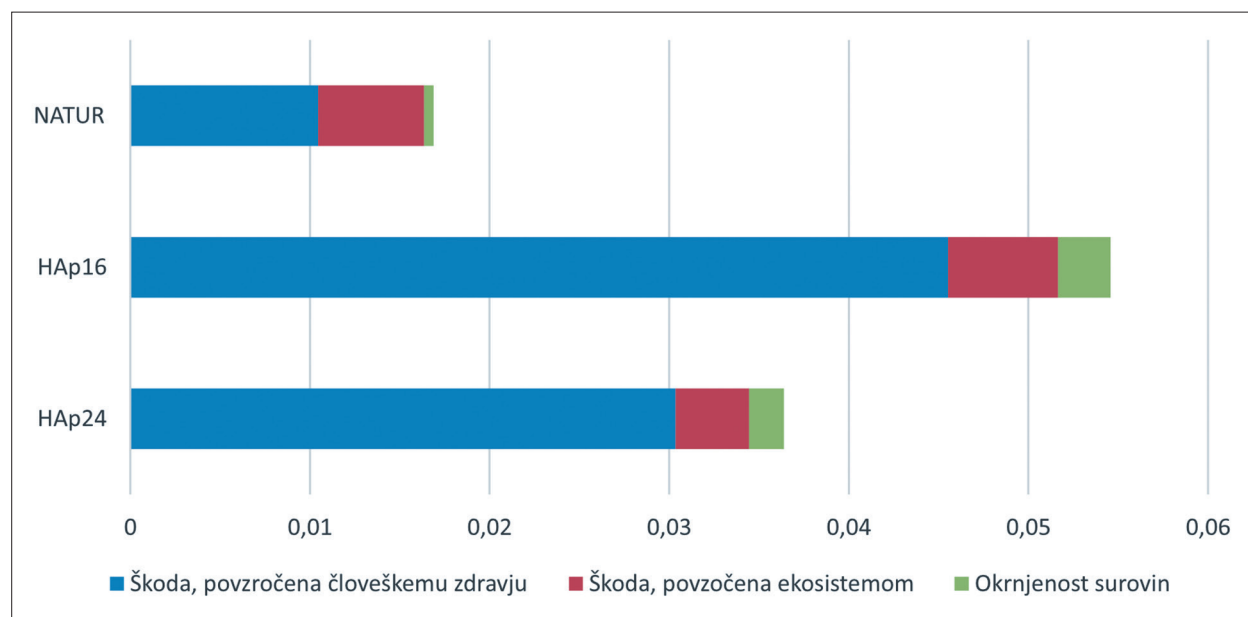
Figure 4. Impacts of midpoint categories after normalization when comparing variants 'NATUR', 'Hap16' and 'Hap24'.

3.2 REZULTATI LCC ANALIZE

3.2 THE RESULTS OF LCC ANALYSIS

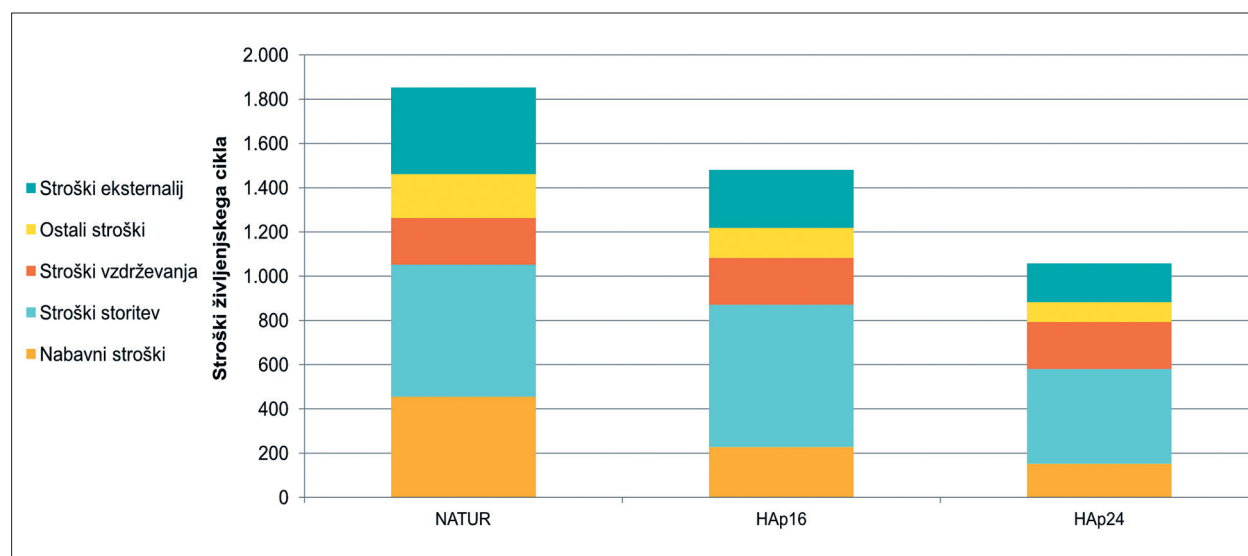
Na sliki 6 so prikazani rezultati LCC analize za obravnavano funkcionalno enoto (30 let funkcije sedenja). Stroški življenjskega cikla sedišča in naslona Plečnikove klopce so najnižji za mineraliziran les z življenjsko dobo 24 let, najvišji pa za referenčni les

NATUR. Skupni okoljski stroški (stroški eksternalij) so bili za les NATUR 391,63 €, za HAp16 262,11 € in za HAp24 174,75 €. Brez upoštevanja stroškov zaradi onesnaževanja okolja stroški lesa NATUR znašajo 1461,04 €, stroški lesa HAp16 znašajo 1218,15 €, stroški za HAp24 znašajo 882,81 €. Stroški eksternalij v največji meri predstavljajo stroški zaradi iz-



Slika 5. Vplivi Endpoint kategorij po normalizaciji pri primerjavi alternativ 'NATUR', 'Hap16' in 'Hap24'.

Figure 5. Impacts of endpoint categories after normalization when comparing variants 'NATUR', 'Hap16' and 'Hap24'.



Slika 6. Grafični prikaz rezultatov stroškovne analize življenjskega cikla sedišča in naslona Plečnikove klopce.

Figure 6. Graphical representation of the results of the life cycle cost analysis of the Plečnik bench (seat and backrest).

rabe kmetijskih površin (NATUR 361,67 €; HAp16 185,14 €; HAp24 123,43 €). Nezanemarljiv del stroškov vplivov na okolje predstavljajo tudi formacija drobnih delcev (NATUR 11,04 €; HAp16 17,69 €; HAp24 11,79 €), klimatske spremembe (NATUR 3,62 €; HAp16 31,68 €; HAp24 21,12 €), zakisovanje zemlje (NATUR 2,81 €; HAp16 13,74 €; HAp24 9,16 €) ter izraba urbanih površin (NATUR 8,38 €; HAp16 8,82 €; HAp24 5,88 €).

4 RAZPRAVA

4 DISCUSSION

Primerjali smo vplive na okolje treh alternativ sedišča in naslona Plečnikove parkovne klopce. Pri lesu NATUR izstopajo negativni vplivi na rabo tal, kar je posledica večje porabe lesa, ki se kaže tudi v večjih potrebah po sečnji dreves. Pri alternativah HAp16 in HAp24 izstopa raba vode, ki je posledica procesa impregnacije. Vplivi še posebej izstopajo pri HAp16, kjer je bila frekvenca ponavljanja procesa impregnacije znotraj naše funkcionalne enote večja kot pri HAp24. Proces impregnacije, skupaj z jeklom (vijaki), izstopa tudi pri rakotvornih toksičnih vplivih na človekovo zdravje. Znano je, da so sekundarni materiali in procesi, ki vsebujejo kemikalije, pogosto najbolj problematičen element v analizah LCA, ki obravnavajo lesne sisteme. Vendar so vrednosti vseh vplivov znotraj našega sistema zelo majhne, nekatere, npr. eutrofikacija in troposferski ozon, skoraj zanemarljive, in ne predstavljajo tveganja. Ker je celoten sistem okolju prijazen in ne vsebuje specifično problematičnih elementov (npr. rakotvornih kemikalij za zaščito lesa, čezoceanskih transportov itd.), procesi, kot je impregnacija, ki so intenzivnejši v porabi energije in surovin, predstavljajo ključni delež vplivov in se kažejo kot okoljsko problematični, čeprav so vrednosti emisij zelo majhne (< 0,01 na enoto emisije). Pri večini kategorij se kažejo tudi vplivi mehanske obdelave lesa. Pri teh procesih glavni del vplivov predstavlja porabljena energija. V naših izračunih je bilo uporabljeno energijsko povprečje Evrope (Podatkovna baza Ecoinvent 3.9.1), kar pomeni, da so bili upoštevani različni deleži trajnostnih (45 %) in netrajnostnih (55 %) virov energije. Vrsta uporabljene energije lahko bistveno vpliva na rezultate, zato bi lahko le-ti odstopali v primeru uporabe izključno trajnostne energije oziroma v primeru upora-

be energije, pridobljene izključno iz fosilnih goriv. Pri analizi Endpoint kategorij, kjer na videz močno prevladujejo negativni vplivi na človekovo zdravje, moramo ponovno upoštevati zelo majhne dejanske vrednosti vplivov ter sistem vrednotenja Endpoint kategorij, ki pri normalizaciji bistveno večjo težo polaga na škodo, povzročeno človeškemu zdravju (40 %) in škodo, povzročeno ekosistemom (40 %), kot na okrnjenost surovin (20 %). V obravnavanem sistemu je bil za HAp in montanski vosek uporabljen poenostavljen nabor kemikalij, ki se ni izkazal kot problematičen oziroma tvegan. Za točnejšo analizo vplivov HAp in montanskega voska bi morali v sistem vnesti primarno pridobljene vhodne parametre, upoštevajoč vse morebitne emisije v zrak, vodo in zemljo.

Pri primerjavi stroškov različnih sedišč in naslonov je LCC analiza potrdila superiornost lesa HAp24, pri čemer se je referenčni les NATUR izkazal kot najdražja alternativa (z upoštevanjem in brez upoštevanja stroškov eksternalij). Večje razlike v stroških so se pojavile v nabavnih stroških. Večja količina lesa in vijakov znotraj funkcionalne enote je predstavljala pomemben dejavnik za večjo ceno referenčnega lesa. Podobno so na skupne stroške vplivali ostali stroški, ki zajemajo transport. Pri stroških, ki so znotraj sistema vezani na frekvenco ponovitev (nakup lesa, transport lesa ...), je pomembno upoštevati, da lahko delež teh stroškov znotraj skupnih stroškov bistveno niha glede na spreminjanje cen na trgu. Stroški storitev (predvsem impregnacije) predstavljajo največji delež skupnih stroškov, zato je ključno, da ima impregniran, površinsko obdelan les bistveno daljšo življenjsko dobo od netretiranih alternativ. Stroški eksternalij so v našem sistemu v večini zastopani s količino porabljenega lesa. Posledično so le-ti najvišji za referenčni les.

5 ZAKLJUČKI

5 CONCLUSIONS

Pri analizi vplivov na okolje znotraj faze uporabe ter analizi stroškov življenjskega cikla za tri alternativne variante sedišč in naslonov Plečnikove parkovne klopce so se vse variante izkazale kot okolju prijazne, brez kritičnih vplivov na okolje. Referenčni les sedišča in naslona iz bukovine, premazane z montanskim voskom, ima življenjsko dobo 8 let in se je izkazal za najdražjo alternativo. Pri analiziranju

mineralizirane bukovine, premazane z montanskim voskom, se je življenjska doba izkazala za ključen dejavnik. V splošnem se je izkazalo, da je mineraliziran les okolju prijazna rešitev, saj brez uporabe toksičnih sredstev lesu podaljša življenjsko dobo, posledično se ohranja gozdnatost, zmanjšan je tudi negativni vpliv na biotsko raznovrstnost. Ker je proces impregnacije intenzivnejši od ostalih procesov v obravnavanem sistemu, je varianta sedišča in naslona z življenjsko dobo 16 let predstavljala okolju najslabšo alternativo. Obe analizi, LCA in LCC, sta kot okolju najprijaznejšo in najcenejšo varianto izpostavili sedišče in naslon iz mineraliziranega lesa z življenjsko dobo 24 let. Analiza je potrdila, da je pri izdelkih, ki jim podaljšujemo življenjsko dobo, ključno, da pazimo na mejo med doseženo življenjsko dobo in energetsko/kemijsko intenzivnostjo procesov za doseganje daljše življenjske dobe.

6 POVZETEK

6 SUMMARY

In this study, LCA (Life Cycle Assessment) and LCC (Life Cycle Cost) analyses were carried out to compare three alternative seats and backrests of a Plečnik bench. Two wood variants were mineralized beech wood with a service life of 16 (HAp16) and 24 (HAp24) years and the reference wood variant was non-mineralized beech wood (NATUR) with a life cycle of 8 years. All variants were surface treated with montan wax. For the LCA analysis the ReCiPe method was used. In the midpoint categories, variant HAp16 proved to be the most polluting and dominated in most categories (global warming, ionizing radiation, fine particulate matter formation, terrestrial acidification, freshwater eutrophication, terrestrial ecotoxicity, freshwater ecotoxicity, marine ecotoxicity, human non-carcinogenic toxicity, mineral resource scarcity, fossil resource scarcity, water consumption), in the remaining categories (land use, stratospheric ozone depletion, ozone formation, marine eutrophication, carcinogenic toxicity to humans) the NATUR variant causes the greatest impact. The HAp24 variant showed medium values for all midpoint categories. After normalization of the results to compare categories with otherwise different units, it was found that the most problematic category was water consumption. Water consumption was

especially significant for the alternatives HAp16 and HAp24 due to the impregnation processes. In addition to impregnation, the processing of steel for screws has also been identified as an indicator of higher water consumption. Since impregnation was more frequent in HAp16 than in other variants in the defined functional unit (30 years), this could explain the results. Most of the carcinogenic toxicity, which also had higher levels, was caused by the use of steel, more specifically by the processes of ore extraction and processing.

The NATUR variant proved to be the most expensive alternative, while the HAp24 variant turned out to be the cheapest. Our life cycle cost analysis included investment costs, maintenance costs, service costs, other costs, and externalities, which were presented in our study as environmental prices representing the impact of pollution on the socio-ecological system. Both total (€1,852.67) and individual pollution (€391.63) costs were highest in the NATUR variant and lowest in the HAp24 variant. Total costs for HAp24 were €1,057.57 and the individual pollution costs were €174.57. The total cost for the alternative HAp16 were €1,480.27 €, while the individual pollution costs are €262.11. The highest pollution costs with the variant NATUR are due to the fact that the largest amount of wood is needed, and so more trees are felled.

Overall, all variants prove to be environmentally friendly and have no significant impact on the environment. Processes that are more energy intensive or contain chemicals appear to be environmentally harmful. However, the actual impacts were very small and should not be considered threatening. The results show that durability is a very important criteria in the use of wood preservatives, as the impacts due to the energy and chemical intensity of the processes can easily exceed the benefits of a longer product life.

ZAHVALA

ACKNOWLEDGEMENTS

Raziskavo je finančno podprla Javna agencija za znanstvenoraziskovalno in inovacijsko dejavnost Republike Slovenije (ARIS), v okviru programov Les in lignocelulozni kompoziti (P4-0015) in Gozdno-lesna veriga in podnebne spremembe: prehod v krožno biogospodarstvo (P4-0430).

VIRI

REFERENCES

- Archer, K., & Lebow, S. (2006). Wood preservation. In: Primary Wood Processing. Springer, Dordrecht.
- Bolin, C. A., & Smith, S. (2011). Life cycle assessment of ACQ-treated lumber with comparison to wood plastic composite decking. *Journal of Cleaner Production*, 19(6), 620–629. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.12.004>
- Bolin, C. A., & Smith, S. (2011). Life cycle assessment of borate-treated lumber with comparison to galvanized steel framing. *Journal of Cleaner Production*, 19(6), 630–639. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.12.005>
- Búryová, D., & Sedlák, P. (2021). Life cycle assessment of coated and thermally modified wood façades. *Coatings*, 11(12), 1487. DOI: <https://doi.org/10.3390/coatings11121487>
- Candelier, K., & Dibdiakova, J. (2021). A review on life cycle assessments of thermally modified wood. *Holzforschung*, 75(3), 199–224. DOI: <https://doi.org/10.1515/hf-2020-0102>
- Čufar, K., Gorišek, Ž., Merela, M., Kropivšek, J., Gornik Bučar, D., & Straže, A. (2017). Lastnosti bukovine in njena raba. *Les*, 66(1), 27–39. DOI: <https://doi.org/10.26614/les-wood.2017.v66n01a03>
- Dias, A. M. A., Santos, P. G. G., Dias, A. M. P. G., Silvestre, J. D., & Brito, J. (2022). Life cycle assessment of a preservative treated wooden deck. *Wood Material Science & Engineering*, 17(6), 502–512. DOI: <https://doi.org/10.1080/17480272.2021.1897673>
- Hill, C., Hughes, M., & Gudsell, D. (2021). Environmental impact of wood modification. *Coatings*, 11(3), 366.
- Hu, J., Skinner, C., Ormondroyd, G., & Thevenon, M. F. (2023). Life cycle assessment of a novel tannin-boron association for wood protection. *Science of The Total Environment*, 858, 159739. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159739>
- Humar, M., Kržišnik, D., Lesar, B., Thaler, N., & Žlahtič, M. (2015). Življenjska doba bukovine na prostem. *Gozdarski vestnik*, 73(10), 461–469.
- Humar, M., Lesar, B., & Kržišnik, D. (2020). Tehnična in estetska življenjska doba lesa. *Acta Silvae et Ligni*, 121, 33–48. DOI: <https://doi.org/10.20315/ASetL.121.3>
- Implementacija ciljev trajnostnega razvoja. 2020. URL: https://slovenia2030.si/files/VNR2020_Slovenia-SI.pdf (15. 7. 2023)
- Javni razpis Javnega holdinga Ljubljana za parkovno klop tip Plečnik. URL: nacrtparkovna_klop_tip_plecnik.pdf (vokasnaga.si) (28. 7. 2023)
- Kraigher, H., Humar, M., & Gričar, J. (ur.) (2023). Gozd in les: gozd prihodnosti [na spletu]. Zbornik recenziranih znanstvenih prispevkov na domači konferenci. Ljubljana: Gozdarski inštitut Slovenije, Založba Silva Slovenica. URL: <https://dirros.openscience.si/lzpisGradiva.php?lang=slv&id=16558> (12. 8. 2023)
- Kuka, E., Cirule, D., Andersons, I., Andersons, B., Kurnosova, N., Vetrovins, A., & Puke, M. (2023). Environmental performance of combined treated wood. *Wood Material Science & Engineering*, 18(1), 88–96. DOI: <https://doi.org/10.1080/17480272.2022.2153737>
- Montazeri, M., & Eckelman, M. J. (2018). Life cycle assessment of UV-Curable bio-based wood flooring coatings. *Journal of Cleaner Production*, 192, 932–939. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.209>
- Obrotna zbornica Slovenije (2013). Priporočen cenik mizarskih del. URL: <https://www.ozs.si/datoteke/ozs/staro/Media/Dokumenti/OZS/Sekcije%20in%20odbori/Iris/lesarji/Priporo%C4%8Den%20cenik%20mizarskih%20del%20dec2013.pdf> (3. 8. 2023)
- Podatkovna baza Ecoinvent 3.9.1
- PRé Sustainability B.V. (2003). Programska oprema SimaPro 9.5.0.1
- Sesana, M. M., & Salvalai, G. (2013). Overview on life cycle methodologies and economic feasibility for nZEBs. *Building and Environment*, 67, 211–216. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.builenv.2013.05.022>
- Silvaprodukt. Silvacera. URL: <https://silvaprodukt.si/izdelek/silvacera/> (2. 8. 2023)
- Sinkko, T., Sanyé-Mengual, E., Corrado, S., Giuntoli, J., & Sala, S. (2023). The EU Bioeconomy Footprint: Using life cycle assessment to monitor environmental impacts of the EU Bioeconomy. *Sustainable Production and Consumption*, 37, 169–179. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.spc.2023.02.015>
- Slovenski državni gozdovi (2023). Cenik za direktno prodajo za obdobje veljavnosti od 1.7. 2023 URL: <https://sidg.si/index.php/javna-narocila-objave/prodaja-lesa-in-logistika/cenik-za-direktno-prodajo> (3. 8. 2023)
- Vijaki.net. Vijak s šestrobo glavo, DIN 933, polni navoj. URL: <https://www.vijaki.net/inox-vijak-s-sestrobo-glavo-m8-din-933-nerjavni-a4> (3. 8. 2023)
- Tesarstvo Rutnik. Žagan les bukev. URL: <http://tesarstvo-rutnik.si/za-gan-les-bukev/> (2. 8. 2023)
- Turk, J., Pranjic, A. M., Tomasin, P., Škrlep, L., Antelo, J., Favaro, M., Sever Škapin, A., Bernardi, A., Ranogajec, J., & Chiurato, M. (2017). Environmental performance of three innovative calcium carbonate-based consolidants used in the field of built cultural heritage. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 22, 1329–1338. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11367-017-1260-8>

