

Smanjenje emisija CO2 u primjeni čelika u građevinarstvu

Markasović, Dorotea; Dokšanović, Tihomir; Galić, Mario

Source / Izvornik: **Zbornik radova - 1. međunarodna studentska GREEN konferencija, 2021, 232 - 243**

Conference paper / Rad u zborniku

Publication status / Verzija rada: **Published version / Objavljena verzija rada (izdavačev PDF)**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:133:443598>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-23**



GRADEVINSKI I ARHITEKTONSKI FAKULTET OSIJEK
Faculty of Civil Engineering and Architecture Osijek

Repository / Repozitorij:

[Repository GrAFOS - Repository of Faculty of Civil Engineering and Architecture Osijek](#)





Smanjenje emisija CO₂ u primjeni čelika u građevinarstvu

Reduction of CO₂ emissions in structural applications of steel

pregledni rad/review paper

UDK/UDC: 502.131.1 : 624.014.27

Dorotea Markasović*, Tihomir Dokšanović, Mario Galić

Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Građevinski fakultet Osijek, Vladimira Preloga 3, 31000 Osijek, Hrvatska

*dopisni autor: e-mail: dorotea.markasovic@gmail.com

Sažetak. Održiva gradnja i u sklopu nje smanjenje emisija CO₂ predstavljaju trend unutar kojega se osvještava društvo i konkretno pokušava smanjiti negativan utjecaj na okoliš kroz proizvodnju, transport, ugradnju, korištenje, odlaganje i uporabu materijala – životni ciklus materijala. Prema nekoliko metoda procjene utjecaja materijala na okoliš i prema zastupljenosti u građevinarstvu, čelik kao materijal ima potencijal za značajna smanjenja emisija. Osnova za takva smanjenja je razmatranje utjecaja materijala kroz sve faze građevinskih projekata, uz angažman svih dionika tijekom, prije i nakon tih faza. Racionalizacija u pogledu željenog smanjenja emisija prvenstveno je moguća primjenom optimizacijskih modela te potencijalnom uporabom otpadnih materijala u druge svrhe. U kontekstu optimizacije životnog ciklusa čelika u literaturi su poznati model transportnog problema, *product-mix* optimizacijski model, *blending* modeli, modeli za određivanje

optimalnih izmjera ingota te *cutting stock* modeli. Danim pregledom primjenjivih modela kroz različite faze omogućuje se uvid u potencijale za promjenu trenutnog stanja i daju se upute za dionike na koji način mogu pristupiti promjenama. Dodatno, prikazom područja gdje se nusprodukti određenih faza mogu primijeniti, djeluje se izravno na smanjenje crpljenja prirodnih resursa i smanjenje opterećenja na postojeća odlagališta otpada. **Ključne riječi** održiva gradnja, okoliš, optimizacija, optimizacijski modeli, životni ciklus

Uvod

Trend brze ekonomije, odnosno što bržeg obrtaja kapitala, posljednjih je desetljeća toliko uznapredovao da razvijene zemlje bilježe potrošnju resursa koja, ne samo premašuje već postojeće resurse na Zemlji, nego zahtijeva do pet puta više. U tome prednjače Ujedinjeni Arapski



Emirati i Sjedinjene Američke Države, dok je Kina tek na šestom mjestu s koeficijentom potrošnje 1,1 (McDonald, 2015). U svjetlu toga, koncept održivog razvoja (zadovoljiti potrebe današnjice, bez dovođenja u pitanje mogućnost budućih generacija da zadovolje svoje potrebe) nastoji ujednačiti svoja tri temeljna oslonca – socijalnu pravdu, ekonomsku sigurnost i ekološku ravnotežu (Borozan, 2012) te se, uz koncepte ekonomije sreće i zelene ekonomije, može razmatrati kao „kontrauteg“ konzumerizmu, svojevrsna „zelena“ poluga.

Onečišćenje ugljikovim dioksidom zbog učinka staklenika posljedično vodi globalnom zatopljenju i narušavanju sveukupne ekološke ravnoteže. Iako su najveći svjetski zagađivači naftna i tekstilna industrija, građevinski sektor također ostvaruje velik udio, čak trećinu globalnih emisija (Condliffe, 2015), u ukupnoj svjetskoj emisiji ugljikova dioksida. Prvenstveno se tu ističe metaloprerađivačka industrija s doprinosom od otprilike 9,0 % na svjetskoj razini (IPCC, 2006). S obzirom na zastupljenost, čelik kao materijal ima potencijal za značajna smanjenja emisija. Svrha rada je dati pregled optimizacijskih modela koji se mogu primijeniti u različitim fazama proizvodnje čeličnih proizvoda i na taj način reducirati emisiju ugljikova dioksida, kao i ostvariti dodatni benefiti za korisnike u pogledu smanjenja troškova, smanjenja crpljenja prirodnih resursa te smanjenja otpada koji je

potrebno transportirati na, za to predviđena, odlagališta. Integracijom optimizacijskih modela u sustave poslovanja postiže se ekološki prihvatljivo poslovanje čime se prezentira društvena odgovornost poduzeća te minimaliziraju gubitci resursa. Dodatna svrha rada je pružiti pregled mogućih načina smanjenja emisija kroz faze životnog ciklusa.

Životni ciklus čelika

Čelik je legura sastavljena od željeza, ugljika te pratećih i legirajućih elemenata. Željezo, kao nazastupljeniji dio čelika, element je koji se često susreće u Zemljinoj kori te deseti po redu zastupljeni element u svemiru. S obzirom na prirodno podrijetlo elemenata od kojih se sastoji, inicijalna faza u životnom ciklusu čelika je iskop željezne rude. Prvotno se željezna ruda dobivala iskapanjem neposredno ispod površinskog sloja ili na samoj površini. Napretkom tehnologije, danas se za dobivanje željeza često koristi magnetit (40,0 %) i hematit, a uobičajeni su dubinski i površinski iskopi (Malekin, 2005). Željezom bogata rudna područja su zabilježena u Južnoj Americi (posebice Brazil), zapadnim dijelovima Australije, u Kini i Indiji, Ukrajini i Švedskoj, Rusiji, Kanadi, SAD-u i Južnoafričkoj Republici (U.S. Geological Survey, 2016). Nekontrolirano crpljenje ovog prirodnog resursa u slabije razvijenim zemljama može imati značajan utjecaj na okoliš, a time i čovjeka. Posljedica mogu biti sporo

regenerirajuća oštećenja velikih površina tropskih kišnih šuma, kao i onečišćenje plovnih puteva. Emisija CO₂ u ovoj fazi iznosi otprilike 11,9 kilograma po toni željezne rude (Haque i Norgate, 2015). Proizvodnja čelika je druga faza u životnom ciklusu čelika (Slika 1) i tijekom nje je razina emitiranja ugljikova dioksida najveća – iznosi 5,0 - 6,5 %

ukupne svjetske emisije CO₂, što znači emitiranje od približno dvije tone CO₂ po proizvedenoj toni čelika (Lisienko i sur., 2016). Godine 2009., prema Kundak i sur., (2009), ova veličina kretala se 4,0 - 5,0 %, što ukazuje na neefikasnost u zbrinjavanju CO₂. Tome najviše pridonosi obrada u visokim pećima.



Slika 1. Životni ciklus čelika (Dokšanović i sur., 2012)
Figure 1. Steel life cycle (Dokšanović et al., 2012)

Visoke peći u velikoj mjeri koriste ugljen, stoga se njegovim sagorijevanjem oslobađa nezanemariva količina CO₂. Osim visokih peći, koriste se i elektrolučne gdje je emisija CO₂ manja za 40,0 % ako se radi o mješavini čeličnog otpada (70,0 %) i rude (30,0 %). Ako elektrolučna peć koristi mješavinu sa stopostotnim udjelom otpadnog čelika, smanjenje, u odnosu na visoke peći, iznosi 76,2 % (Dokšanović i sur., 2012). Proizvodnja proizvoda od čelika vrši se u postrojenjima i tvornicama, kao što su tvornica automobila, brodogradilište i sl. Otpad koji se javi prilikom oblikovanja

proizvoda (primjerice, rezanjem kako bi se dobio odgovarajući oblik, otpad nastao prije uporabe proizvoda) vraća se u proizvodnju čelika. Procijenjena ukupna emisija u ovoj fazi iznosi približno 10,0 % ukupne emisije ugljikova dioksida. Teško je dati precizniji podatak zbog emisije uzrokovane radom strojeva u samoj proizvodnji, odnosno, teško je razlučiti konkretan izvor emisije. U fazi uporabe proizvoda emisije proizlaze iz samog rabljenja proizvoda. Primjerice, proizvođači automobila nastoje smanjiti masu automobila kako bi



bilo potrebno manje goriva te kako bi se zadovoljili sve stroži propisi po pitanju emisije ispušnih plinova. Paradoksalno, neuobičajeno velikim smanjenjem emisija u ovoj fazi zbog uporabe materijala manje gustoće, utječe se na povećanje stakleničkih plinova u drugim fazama životnog ciklusa proizvoda, stoga je preporuka koristiti čelike s posebnim legirajućim elementima koji poboljšavaju njihova svojstva i čine ih učinkovitijima (WorldSteel Association, 2016). Emisija ispušnih plinova po automobilu od ovakvog materijala na 200 000 km je otprilike 14,0 % ukupne emisije stvorene u životnom ciklusu (WorldSteel Association, 2016).

Čelik se može reciklirati. Svake godine industrija čelika reciklira preko 14 milijuna tona iz automobilske otpada (Morselli i sur., 2010). Studija provedena u Ujedinjenom Kraljevstvu pokazuje da se 94,0 % čelika reciklira kada se zgrada sruši, a kod čelika za armiranje, rezultati su još bolji – reciklira se čak 99,0 % (Tata Steel, 2017). Reciklirani otpad se, kao i otpad nastao prije uporabe, vraća u proizvodnju čelika. Procjena je da se u svijetu godišnje reciklira 7,2 megatone čeličnog otpada (oko 60,0 % ukupne godišnje proizvodnje) (Calkins, 2009), što je ekvivalentno sprječavanju 11 megatona emisije CO₂ u atmosferu (odnosno, povlačenju 280 tisuća automobila s cesta) (WorldSteel Association, 2017). Emisija u fazi reciklaže iznosi najmanje 5,6 % ukupne emisije u životnom ciklusu (Damgaard i sur., 2009).

Zanimljivo je kako su sveukupne emisije osnovnih metala kao što su olovo, cink, aluminij, jednake otprilike 33,0 % emisije ugljika globalne industrije čelika (Farrell, 2009). Godine 2010. zabilježene su emisije CO₂ u ukupnom iznosu od 2500 milijuna tona nastale samo iz procesa proizvodnje čelika, s tim da je predviđen rastući trend koji bi do 2050. godine mogao iznositi 2800 milijuna tona. Danim pregledom faza ciklusa može se zaključiti kako se najznačajnija emisija CO₂ javlja u fazi proizvodnje čelika, a najmanja emisija u fazi iskapanja željezne rude.

Moguće uštede u emisijama po fazama

Smatra se da emisija ugljikova dioksida uzrokuje 55,0 % globalnog zatopljenja (Yeh i Bai, 1999). Kako bi se emisija što je moguće više smanjila, do sada su predložene različite metode uporabe, zamjene i zbrinjavanja. Prije svega, to su procesi selektivnog odvajanja CO₂ iz plinskih smjesa za njegovu daljnju primjenu, moguća primjena alternativnih goriva (npr. zamjena ugljena prirodnim plinom), proizvodnja korisnih kemikalija i materijala koristeći CO₂ kao reagens ili sirovinu te reciklaža CO₂ i njegova eksploatacija kao izvora ugljika za kemikalije i goriva (Haramija, 2013). Nadalje, zbrinjavanje CO₂ može biti geološko ili u oceanu, a koriste se i metode pretvorbe u karbonatne minerale i visokoučinska solarna fotokatalitička konverzija CO₂ i vodene pare u ugljikovodična goriva. Posebno interesantna metoda je hvatanje CO₂



pomoću stijena primijenjena u Omanu. Peridotit stvara karbonatne stijene kada dođe u kontakt s ugljikovim dioksidom (Haramija, 2013). Primijećeno je kako ovakav prirodan sustav zbrinjavanja CO₂ na godišnjoj bazi premašuje učinak od nekoliko stotina tisuća tona. Prirodni sustav potpomognut djelovanjem čovjeka može skladištiti milijardu tona CO₂ godišnje po 1 km³ stijene (Dabirian i sur., 2012; Haramija, 2013). Ipak, ovakve načine zbrinjavanja najviše koriste naftna i plinska industrija.

Budući da je zamijećen znatan porast prosječne uporabe čelika po glavi stanovnika u svijetu (2001. godine je iznosila 150,0 kg, a deset godina kasnije 215,0 kg), važno je razmotriti mogućnosti uštede emisija CO₂ (Aggarwal i Gupta, 2015). U fazi iskopa željezne rude predlaže se lokalizacija proizvodnje, ako za to postoje uvjeti. Naime, Kina, kao najveći svjetski proizvođač čelika, ujedno i zadovoljava najveći dio svjetske potražnje. Iako bi zbog trenutne ekonomske situacije lokalna proizvodnja bila nešto skuplja od uvoza, investitori su spremni platiti razliku u cijeni zbog društveno odgovornog poslovanja. Dobrobit je očigledna u poticanju lokalnog gospodarstva, kao i u potencijalnom smanjenju emisije stakleničkih plinova zbog redukcije raznih oblika transporta. Osim toga, smanjenje emisije CO₂ moguće je u ovoj fazi postići modernizacijom mehanizacije.

U energetski i okolišno najintenzivnijoj fazi proizvodnje, uz spomenute moguće

uštede kroz vrste peći, postoje još neke mogućnosti. Na učinkovitost svakako utječe vrsta rude i ugljena te stupanj modernizacije cijelog postrojenja, ali moguće je uporabiti i nusprodukte proizvodnje. Tako se, primjerice, svi otpadi unutar proizvodnje proizvoda vraćaju natrag u čeličanu, čime se takav otpad eliminira. No ovdje je važno napomenuti da se čeličanska zgura može upotrijebiti u cestogradnji (Barišić et al., 2015) ili kao zamjena za dio prirodnog agregata u betonu i čak cementa (Ignjatić i Netinger, 2010; Netinger i sur., 2011). Na navedeni način ne samo da se eliminira faza transporta otpada do odlagališta, nego i samo punjenje odlagališta tim materijalom. Stvarni benefit stvara se i eliminiranjem svih faza povezanih uz material koji taj otpad mijenja, što su značajne uštede emisija CO₂, ali i novca.

Što se tiče zakonske regulative, Kina nema tako striktna pravila po pitanjima zaštite okoliša kao Europska unija ili Sjedinjene Američke Države (iako niti SAD nije potpisnica Kyoto protokola).

Brojne tvornice mogu smanjiti emisije ugradbom pročišćivača zraka. Dodatno, ugljikov dioksid može se rabiti za različite tehnološke procese, kao što su rashladni sustavi, gašenje požara, zavarivanje. No, trenutna uporaba CO₂ u navedene svrhe, naspram emisije nastale zbog ljudskog djelovanja, i dalje ostaje posve zanemariva. Valja istaknuti i kako je CO₂ moguće, uz različite kemijske dodatke, pretvoriti u visokoenergetsko gorivo, no, ono je isplativo samo ako se



pri konverziji koriste obnovljivi izvori energije (Haramija, 2013).

Moguća ušteda u fazi uporabe proizvoda za automobilsku industriju je značajna i za čelike s posebnim legirajućim elementima najveća – raspon se kreće od 193 do 798 kg smanjenja emisije CO₂ (WorldSteel Association, 2016). Pod aktivne mjere uštede prije same uporabe čelika može se svrstati pažljivo i promišljeno projektiranje, što izravno pridonosi smanjenju uporabe te kasnije otpada materijala. Prilikom projektiranja valja odmah promisliti i o kasnijim mogućnostima održavanja te programima obnove jer se na taj način produljuje trajnost konstrukcija. Dodatno, u postupku smanjenja uporabe čelika veliku ulogu ima pouzdanost u proračunskim postupcima za dimenzioniranje čeličnih konstrukcija. Stalnim istraživanjima polako se dolazi do gotovo idealnih parcijalnih faktora za konstrukcijski čelik.

Dobar primjer prakse iz Njemačke pokazuje da je korištenjem reciklažnog čelika moguće ostvariti smanjenje emisije CO₂ od 12 %, a Harris i Elliot (1997) naglašavaju veće emisije CO₂ kod zgrada čija je nosiva konstrukcija od recikliranog čelika, nego od recikliranog betona.

Poznati optimizacijski modeli za smanjenja emisija CO₂

Za optimizaciju životnog ciklusa čelika mogu se koristiti različiti optimizacijski modeli, primjerice model transportnog

problema, *routing* modeli, *product-mix* optimizacijski model (koji se u literaturi može pronaći i pod nazivom *blending* model), modeli za određivanje optimalnih izmjera ingota, tj. *cutting stock* modeli. Modeli se praktično rješavaju različitim metodama i alatima čija preciznost varira ovisno o ulaznim parametrima, složenosti problema (broj, oblik varijabli i ograničenja, linearnost ili nelinearnost funkcije cilja).

Linearno programiranje (LP) jedna je od metoda operacijskih istraživanja, no neki autori je definiraju i kao granu primijenjene matematike (Barković, 2001; Petkoviček, 2013). Prvotno je uvedena kako bi se riješio problem planiranja proizvodnje, a prije i poslije Drugog svjetskog rata bilježi najveći napredak (Weiss i Gershon, 1989). Problem linearnog programiranja formulira se linearnom funkcijom cilja uz ograničenja ili uvjete dane u obliku jednadžbi i nejednadžbi te uz kontinuirane varijable odlučivanja (Petkoviček, 2013). Metoda se koristi za optimizaciju dobiti, troškova i drugih varijabli u proizvodnji. U ovom slučaju, cilj je pronaći odgovarajući proizvodni program kojim se minimizira emisija CO₂.

Obrada željezne rude uglavnom se odvija u postrojenjima udaljenim od mjesta iskopa, stoga je prvo potrebno rudu transportirati do mjesta obrade. U ovoj fazi primjenjiv optimizacijski model je model transportnog problema (TP), koji se u literaturi može pronaći i pod nazivom "problem Hitchcocka" prema izvornom autoru koji je strukturirao TP



(Hitchcock, 1941). Transportni problem zapravo je poseban slučaj općeg problema linearnog programiranja.

Transportni problem se teoretski može razmatrati kao balansirani i nebalansirani, s tim da je u realnom sektoru učestaliji nebalansirani model, tj. slučaj kada ukupna ponuda i ukupna potražnja nisu jednake. U slučaju životnog ciklusa čelika, model TP je primjenjiv u svim slučajevima, poglavito prilikom transporta od lokacije iskopa željezne rude do postrojenja za proizvodnju čelika te od postrojenja za proizvodnju čelika do različitih proizvodnih pogona. To se odražava i na emisiju CO₂, odnosno njezino smanjenje, jer se pronalaskom optimalnih putova ona minimizira.

Problematikom pronalaska optimalnih putova bave se *routing* modeli (između ostalih CPP – *Chinese postman problem* – problem kineskog poštara; CARP model – *Capacitated arc routing problem* – kapacitirani problem ruta; TSP – *Travelling salesman problem* – problem trgovačkog putnika). Posebno zanimljiv za usmjeravanje čitavih flota vozila je VRP model (engl. *Vehicle Routing Problem*). Primarni cilj spomenutih modela je pronaći najkraću rutu kojom će se obići sva odredišta prije povratka u ishodište.

Uz probleme vezane za transport usko je vezan problem pravodobne nabave optimalne količine zaliha. Općenito troškovi zaliha mogu doseći i trećinu svih logističkih troškova (Vouk, 2005). Neplanska nabava jedan je od uzročnika

“efekta biča” ili Forresterovog efekta (engl. *Bullwhip effect*) koji, uz povećanje troška transporta, povećanje proizvodnih troškova i u konačnici smanjenje profitabilnosti, uzrokuje i povećane emisije CO₂. Industrija čelika u Ujedinjenom Kraljevstvu prednjači emisijama CO₂ u svojim opskrbnim lancima s čak 1158.22 kg emisije CO₂ po toni čelika (*benchmark*) (Acquaye i sur., 2014). Zbog toga si pojedina poduzeća postavljaju za cilj smanjiti emisije CO₂ u vlastitim opskrbnim lancima za 30 % do 2020. godine (Plambeck, 2012).

S obzirom da je čelik materijal prirodnog podrijetla, optimalni sastav traži se primjenom *product-mix* modela zbog različitih udjela pojedinih elemenata i sirovina ovisno o željenoj vrsti i kvaliteti čelika. Kako je i reciklabilan, jedna od varijabli odlučivanja, prilikom formulacije problema LP, može biti i udio čeličnih otpadaka na raspolaganju, tj. pronaći kombinaciju udjela sirovina koja rezultira minimalnim ukupnim troškovima proizvodnje. Uz to, prednosti korištenja modela su i planiranje održavanja, dugoročno planiranje proizvodnje, minimalna razina skladištenja zaliha, racionalna politika nabave (Dutta i Fourer, 2001). U kontekstu smanjenja emisije CO₂ kao cilj se može zadati pronalazak takve kombinacije sirovina pri kojoj će nastati najmanje emisija CO₂, imajući u vidu zadovoljenje svih ostalih ograničenja.

Product-mix također ima višestruku primjenu u fazi proizvodnje proizvoda. Cilj modela je pronaći optimalne količine



proizvoda koje će generirati maksimalni profit pri minimalnom utrošku resursa (Tablica 1). Optimalni *product-mix* promjenjiv je u vremenu, ovisno o variranju potražnje, dostupnosti resursa, samoj proizvodnji u čeličani (Dutta i Fourer, 2001).

Zbog kompleksnosti procesa proizvodnje čelika može se očekivati i do 2500 ograničenja te 3000 varijabli odlučivanja u pojedinom modelu (Dutta i Fourer, 2001). Zakonskim uredbama regulirano je trgovanje emisijama CO₂, stoga je *product-mix* idealno primjenjiv model zbog

moгуćnosti "Goal seeking" i "What if?" scenarijske analize. Primjerice, u "Goal seeking" analizi korisnik je u mogućnosti zadati konstantnu količinu CO₂ (zavisna varijabla), dok se vrijednosti nezavisnih varijabli mijenjaju kako bi se dosegla ciljna vrijednost zavisne varijable. S druge strane, "What if?" analizom se mijenjaju nezavisne varijable te se promatra promjena zavisne varijable. To znači da je korisnik u mogućnosti mijenjati vrijednosti koje se odnose na količinu proizvodnje pojedinih proizvoda te, s obzirom na to, analizirati promjene emisije CO₂.

Tablica 1. Praktični primjer primjene *product-mix* optimizacijskog modela (Markasović i sur., 2018)

Table 1. Case study application of the *product-mix* optimization model (Markasović et al., 2018)

Proizvedena količina	30	2	20	60	6	30
Proizvod	konstrukcije	nadstrešnice	ograde	stupovi	kontejneri	stepeništa i gazišta
Radnih sati po kom.	18	25	20	5	30	19
Sirovine po kom.	5	7	10	1	26	32
Cijena po kom.	1000,00	3000,00	800,00	150,00	25000,00	15000,00
Varijabilni trošak po kom.	500,00	500,00	200,00	50,00	7000,00	5000,00
Potražnja (komada)	30	2	20	60	6	30
Profit po kom.	500,00	2500,00	600,00	100,00	18000,00	10000,00
Profit	446000					
Iskorišteno radnih sati	2040					
Iskorištene sirovine	1540					

Raspoloživo: 8400 sati ukupna raspoloživa količina
2000 sirovina

Cutting stock model prvi je predstavio Kantorovič 1939. godine (Kantorovich, 1960). Modelom je potrebno naći rješenje problema rezanja komada zaliha standardnih (modularnih) veličina, kao što su papirnati valjci ili ploče lima, u manje komade određenih dimenzija, uz istovremeno minimiziranje gubitaka materijala. Problem se može formulirati

kao model cjelobrojnog linearnog programiranja (engl. *ILP – Integer Linear Programming*), a za rješavanje se koriste razne metode (grananja i ograđivanja, metoda rezanja, itd.). Čelik je specifičan jer je često traženi proizvod (ili neki dio) nepravilnog oblika, stoga se u literaturi *cutting stock* može pronaći i pod nazivom *nesting problem* (Alvarez-Valdes i sur.,



2013). Tvrtka *Bethlehem Steel* 1984. godine razvija dvostupanjski postupak za odabir optimalnih dimenzija ingota (Vasko i sur., 1989). Dvofazni postupak se koristi za odabir optimalnih dimenzija ingota i unutarnjih dimenzija kalupa. Postupkom se razmatra i povećanje prinosa te redukcija raznih metalurških i operativnih ograničenja. U prvoj fazi pronalaze se moguće dimenzije kalupa u skladu s ograničenjima. Cilj je proizvesti što manje kalupa, a koji će dati ingote takvih dimenzija koje će rezultirati proizvodnjom maksimalnog broja gotovih proizvoda, stoga se u drugoj fazi vrši odabir optimalnih dimenzija kalupa, uzimajući u obzir dimenzije ingota te broj gotovih proizvoda. Na temelju rezultata ovog modela te probnih testova, ustanovljena je potencijalna ušteda od osam milijuna dolara na bazi jedne godine u spomenutom poduzeću. Emisiju CO₂ moguće je smanjiti ekonomičnim korištenjem materijala te odgovarajućim zbrinjavanjem preostalog otpada koji se može reciklirati.

Zaključci

Globalna industrija čelika godišnje proizvede preko dvije milijarde tona CO₂, a od toga je preko 90 % iz: Kine, Brazila, EU, Indije, SAD-a, Rusije, Kanade, Australije i Južnoafričke Republike. Budući da je proizvodnja čelika faza životnog ciklusa u kojoj se ostvaruju između 70,0 % i 80,0 % ukupnih emisija CO₂, najviše je

potencijala za moguće uštede upravo u ovoj fazi.

Predloženi načini smanjenja emisija na razini cijelog životnog ciklusa su lokalizacija proizvodnje, modernizacija mehanizacije, korištenje otpadnog materijala nastalog tijekom proizvodnje u druge stvrhe (npr. agregat u betonu), pažljivo promišljeno projektiranje te razrađeni planovi održavanja.

U tu svrhu dan je kraći pregled optimizacijskih modela (model transportnog problema, *routing* modeli, *product-mix*, *cutting stock*) kojima bi se, na opisane načine, moglo doći do smanjenja emisije ugljikova dioksida. Neki od modela (transportni problem, *product-mix*) primjenjivi su u više faza životnog ciklusa čelika.

Literatura

- Acquaye A., Genovese A., Barrett J., Lenny K. S. C. (2014). Benchmarking carbon emissions performance in supply chains. *Supply Chain Management: An International Journal*, **19**(3), 306-321.
- Aggarwal S., Gupta N. (2015). *Applications of Mathematical Programming Models for Product Mix Optimization in World Steel Industry: Challenges and Directions*, New Delhi.
- Alvarez-Valdes R., Martinez A., Tamarit J. M. (2013). A branch & bound algorithm for cutting and packing irregularly shaped pieces. *International Journal of Production Economics*, **145**(2), 463-477.



- Barišić I., Dokšanović T., Draganić H. (2015). Characterization of hydraulically bound base materials through digital image correlation. *Construction and Building Materials*, **83**, 299-307.
- Barković D. (2001). Operacijska istraživanja. Osijek, Croatia: Ekonomski fakultet u Osijeku.
- Borožan Đ. (2012). Makroekonomija. Osijek, Croatia: Ekonomski fakultet u Osijeku.
- Calkins M. (2009). Materials for Sustainable Sites. Hoboken, New Jersey, USA: John Wiley & Sons, Inc.
- Condliffe J. (2015). The Building Industry Could Cut Our Global Emissions By One Third—So Why Hasn't It? Dostupno na <https://gizmodo.com/the-building-industry-could-cut-our-global-emissions-by-1745929653> (24.04.2018.)
- Dabirian R., Beiranvand M., Aghahoseini S. (2012). Mineral carbonation in peridotite rock for CO₂ sequestration and a method of leakage reduction of CO₂ in the rock. *Nafta*, **63**(1-2), 44-48.
- Damgaard A., Larsen A. W., Christensen T.H. (2009). Recycling of metals: accounting of greenhouse gases and global warming contributions. *Waste Management & Research*, **27**(8), 773-780.
- Dokšanović T., Farkaš M., Njegovanović N. (2012). Tržišna prihvatljivost građevinskog materijala s malim udjelom ugljika, Dio I: Materijali i mogućnosti smanjenja utjecaja na okoliš. *Electronic Journal of the Faculty of Civil Engineering Osijek-e-GFOS*, **3**(5), 1-20.
- Dutta G., Fourer R. (2001). A Survey of Mathematical Programming Applications in Integrated Steel Plants. *Manufacturing & Service Operations Management*, **3**(4), 387-400.
- Farrell M. (2009). Carbon emissions from base metal mine sites. *Mining Engineering*(April).
- Haque N., Norgate T. (2015). 20 - Life cycle assessment of iron ore mining and processing A2 - Lu, Liming *Iron Ore* (pp. 615-630): Woodhead Publishing.
- Haramija V. (2013). Tehnologije hvatanja i zbrinjavanja ugljikovog dioksida. *Goriva i maziva*, **51**(4), 306.
- Harris D. J., Elliot C. J. (1997). Energy Accounting for Recycled Building Components. Paper presented at the Second International Conference: Buildings and the Environment, Paris, France.
- Hitchcock F. L. (1941). The Distribution of a Product from Several Sources to Numerous Localities. *Journal of Mathematics and Physics*, **20**(1-4), 224-230.
- Ignjatić G., Netinger I. (2010). Mogućnost primjene alkalijski aktivirane zgure kao veziva u mortu. *e-GFOS*, **1**(1), 115-123.
- IPCC. (2006). Metal Industry Emissions *IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories* (Vol. Volume 3: Industrial Processes and Product Use). Geneva, Switzerland Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).
- Kantorovich L. V. (1960). Mathematical Methods of Organizing and Planning



- Production. *Management Science*, **6**(4), 366-422.
- Kundak M., Lazić L., Črnko J. (2009). CO₂ emissions in the steel industry. *Metalurgija*, **48**(3), 193-197.
- Lisienko V.G., Chesnokov N.Y., Lapteva, A.V., Noskov V.Y. (2016), Types of greenhouse gas emissions in the production of cast iron and steel. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, **150**(1), 1-7.
- Malekin M. (2005). Počeci korištenja željeza u Europi. Dostupno na <http://www.gradimo.hr/clanak/poceci-koristenja-zeljeza-u-europi/1179> (24.04.2018.)
- Markasović D., Has A., Dokšanović T., Zekić-Sušac M. (2018). Optimizacija product mixa metalnih proizvoda linearnim programiranjem. Paper presented at the Treća međunarodna znanstveno-stručna studentska konferencija - SKEI 2018, Vukovar, Croatia.
- McDonald C. (2015). How many Earths do we need? Dostupno na <http://www.bbc.com/news/magazine-33133712> (24.04.2018.)
- Morselli L., Santini A., Passarini F., Vassura I. (2010). Automotive shredder residue (ASR) characterization for a valuable management. *Waste Management*, **30**(11), 2228-2234.
- Netinger I., Bjegović D., Varevac D., Morić D. (2011), Primjena zgure iz čeličana kao agregata u betonu. *Građevinar*, **63**(2), 169-175.
- Petkoviček D. (2013). Linearno Programiranje. Dostupno na <http://matematika.fkit.hr/staro/izborna/referati/Daniela%20Petkovicsek%20-%20Linearno%20programiranje.pdf> (12.05.2018.)
- Plambeck E. L. (2012). Reducing greenhouse gas emissions through operations and supply chain management. *Energy Economics*, **34**, S64-S74.
- Steel T. (2017). The life-cycle of steel. Dostupno na <https://www.tatasteeleurope.com/en/sustainability/steel-for-a-sustainable-future/the-life-cycle-of-steel> (02.05.2018.)
- U.S. Geological Survey. (2016). *Mineral Commodity Summaries 2016*. Reston, Virginia, USA: U.S. Geological Survey.
- Vasko F. J., Wolf F. E., Stott K. L., Scheirer, J. W. (1989), Selecting Optimal Ingot Sizes for Bethlehem Steel. *Interfaces*, **19**(1), 68-84.
- Vouk R. (2005). Uloga menadžmenta opskrbnog lanca u povećanju konkurentnosti poduzeća. *Ekonomski pregled*, **56**(11), 1013-1030.
- Weiss H. J., Gershon M. E. (1989). *Production and operations management*: Allyn & Bacon.
- World Steel Association (2016). Life Cycle Assessment of Steel vs. Aluminium Body Structures. Dostupno na http://www.worldautosteel.org/download_files/Auto%20Mass%20Benchmarking/07_WorldAutoSteel_AutoMassBenchmarking_LCA_20160125.pdf (01.05.2018.)
- World Steel Association (2017). Sustainable Steel – Indicators 2017 and the future. Dostupno na



<https://www.worldsteel.org/media-centre/press-releases/2017/sustainable-steel--indicators-2017-and-the-future.html> (01.05.2018.)

Yeh A. C., Bai H. (1999). Comparison of ammonia and monoethanolamine solvents to reduce CO₂ greenhouse gas emissions. *Science of The Total Environment*, **228**(2), 121-133.

Abstract. Sustainable construction and within it the reduction of CO₂ emissions is a trend which raises social awareness and specifically tries to reduce the negative impact on the environment through production, transportation, installation, use, disposal and use of materials - life cycle of materials. According to several methods of assessing the impact of materials on the environment and their representation in construction, steel as a material has the potential for significant emission reductions. The basis for such reductions is consideration of the impact of

materials throughout all stages of construction projects, with the involvement of all stakeholders during, before, and after these phases. Rationalization of the desired reduction of emissions is primarily possible by using optimization models and the potential use of waste materials for other purposes. In the context steel life cycle optimization, transport problem model, product-mix optimization model, blending models, models for optimum ingot measurement and cutting stock models are well known in published work. By reviewing applicable models through different phases, insight into potentials for changing the current state and guidance to stakeholders on how they can access these changes is given. Additionally, depicting areas where by-products of certain phases can be applied directly reduces extraction of natural resources and strain on existing landfills.

Keywords: sustainable construction, environment, optimization, optimization models, life cycle