

САВЕЗ ИНЖЕЊЕРА И ТЕХНИЧАРА СРБИЈЕ



Научна конференција са
међународним учешћем

**ИНДУСТРИЈА 4.0 У
ЦИРКУЛАРНОЈ ЕКОНОМИЈИ
И ЗАШТИТИ И ОПОРАВКУ
ЖИВОТНЕ СРЕДИНЕ**

Зборник радова



Научна конференција са
међународним учешћем
"ИНДУСТРИЈА 4.0
У ЦИРКУЛАРНОЈ
ЕКОНОМИЈИ
И ЗАШТИТИ И
ОПОРАВКУ
ЖИВОТНЕ СРЕДИНЕ"

Београд
15. децембар 2023.



САВЕЗ ИНЖЕЊЕРА И ТЕХНИЧАРА СРБИЈЕ

**Научна конференција са међународним
учешћем**

**ИНДУСТРИЈА 4.0 У ЦИРКУЛАРНОЈ
ЕКОНОМИЈИ И ЗАШТИТИ И ОПОРАВКУ
ЖИВОТНЕ СРЕДИНЕ**

Зборник радова

Београд, 15. децембар 2023.

Издавач:

Савез инжењера и техничара Србије, Београд

За издавача:

Мр Богдан Влаховић, генерални секретар

Главни и одговорни уредник:

Емеритус проф. др Илија Ћосић

Организациони одбор:

Мр Богдан Влаховић (председник), проф. др Бојан Лалић, проф. др Марко Царић, проф. др Мијодраг Милошевић, др Мирко Бућан, др Марија Симић, др Марија Марковић, Оливера Ћосовић, MSc, Маријана Михајловић, есс, Оља Јовичић, дипл. прав.

Програмски одбор:

Емеритус проф. др Илија Ћосић (председник), проф. др Срђан Колаковић, проф. др Исак Карабеговић, проф. др Бранко Каталинић, др Мирослав Сокић, проф. др Горан Путник, проф. др Снежана Урошевић, емеритус проф. др Лариса Јовановић, др Драгана Ранђеловић

Лектура и коректура:

Оливера Ћосовић, маг. филол.

Технички уредник:

Оља Јовичић, дипл. прав.

Штампа:

Академска издања, Земун

Година издавања: 2023.

ИСБН: 978-86-82563-26-6

Тираж: 200 примерака

ОРГАНИЗАТОР

Савез инжењера и техничара Србије



СУОРГАНИЗАТОРИ

Инжењерска академија Србије

Универзитет у Новом Саду

Факултет техничких наука

**Институт за технологију нуклеарних
и других минералних сировина**

ПОД ПОКРОВИТЕЉСТВОМ

**Министарства науке, технолошког развоја
и иновација Републике Србије**

УЗ ПОДРШКУ

Инжењерске коморе Србије

CIP - Каталогизација у публикацији
Народна библиотека Србије, Београд

330.341.1(082)
338.1:502.131.1(082)
658.567.3(082)

**НАУЧНА конференција са међународним учешћем
Индустрија 4.0 у циркуларној економији и заштити и
опоравку животне средине (2023 ; Београд)**

Зборник радова / Научна конференција са међународним учешћем Индустрија 4.0 у циркуларној економији и заштити и опоравку животне средине, Београд, 15. децембар 2023. ; [организатор] Савез инжењера и техничара Србије ... [и др.] ; [главни и одговорни уредник Илија Ћосић]. - Београд : Савез инжењера и техничара Србије, 2023 (Земун : Академска издања). - 118 стр. : илустр. ; 24 cm

Тираж 200. - Библиографија уз сваки рад. - Abstracts.

ISBN 978-86-82563-26-6

1. Ћосић, Илија, 1948- [главни и одговорни уредник]
а) Привредни развој -- Одрживи развој -- Зборници б)
Циркуларна економија -- Зборници в) Економија --
Технолошки развој -- 21в -- Зборници

COBISS.SR-ID 131923977



СИТС - САВЕЗ ИНЖЕЊЕРА И ТЕХНИЧАРА СРБИЈЕ

ИСТОРИЈАТ И САДРЖАЈ РАДА

ИСТОРИЈАТ

Корени српске техничке цивилизације почињу још у доба Немањића. Зачеци инжењерства су у рударско-металуршким подухватима (Ново брдо) и грађењу величанствених сакралних објеката средњовековне српске државе.

Од Првог (1804), а посебно Другог српског устанка (1815), оживљава српско градитељство које је нарочито од тридесетих година било везано за изградњу саобраћајница, подизање јавних објеката, уређење вароши, и др.

У то време (1834/35. године) из аустријског царства долазе и први државни службеници – “правителствени инцинири” (Франц Јанке и барон Франц Кордон), а у том веку Србијом је прошло око 600 инжењера.

Започињање наставе на Техничком факултету Велике школе 1863. године значило је прекретницу у школовању српских инжењера. Поред школовања у земљи један број инжењера се школовао и у иностранству.

Истовремено са школовањем првих техничких кадрова јавља се и иницијатива за оснивањем стручне, еснафске организације. ТАКО ВЕЋ 3. ФЕБРУАРА 1868. ГОДИНЕ, САМО ГОДИНУ ДАНА ПОСЛЕ ПРЕДАЈЕ КЉУЧЕВА ГРАДА БЕОГРАДА ОД СТРАНЕ ТУРСКОГ ПАШЕ КНЕЗУ МИХАЈЛУ, ДОЛАЗИ ДО ОСНИВАЊА „ТЕХНИЧАРСКЕ ДРУЖИНЕ“, чији је први председник био Емилијан Јосимовић и тај датум је усвојен као година настанка наше организације. Убрзо затим (1869) оснива се и Удружење за пољску привреду, односно Српско пољопривредно друштво.

Године 1890. долази до оснивања Удружења српских инжењера, а од 1895. инжењера и архитеката.

Прво стручно гласило овог удружења „Српски технички лист“ изашао је 1890. године.

ПРВИ ПОЧАСНИ ЧЛАН УДРУЖЕЊА СРПСКИХ ИНЖЕЊЕРА БИО ЈЕ НИКОЛА ТЕСЛА, КОЈИ ЈЕ ТО ПРИЗНАЊЕ ДОБИО ПОВОДОМ СВОГ КРАТКОГ И ЈЕДИНОГ БОРАВКА У БЕОГРАДУ 1892. ГОДИНЕ.

За време Првог светског рата у Солуну, где се налазио велики број инжењера који су били и војници, излазе два броја „Српског техничког листа“ Ту је 1918. године одржана Скупштина Удружења са 463 инжењера.

Удружење је 1932/35. године сопственим средствима, кредитима и добровољним прилозима изградило свој дом у улици Кнеза Милоша 7, а Дом инжењера „Никола Тесла“ ул. Кнеза Милоша 9-11, изграђен је у периоду од 1962. до 1969. године. У ова два дома инжењера смештен је и ради Савез инжењера и техничара Србије са својих 26 републичких струковних и мултидисциплинарних друштава, који се самостално финансирају, од укупно 45 чланица савеза.

Поред **Емијилана Јосимовића**, првог председника, који је био и ректор Лицеја и Велике школе и почасни члан Српске краљевске академије у раду нашег Савеза учествовали су и дали свој допринос и: **Коста Алковић**, проф. Велике школе, министар грађевина, члан Српског ученог друштва и Српске краљевске академије, **Димитрије Стојановић**, професор Техничког факултета и први директор Српских државних железница, члан Српског ученог друштва и Српске краљевске академије, **Милош Савчић**, министар грађевине Србије, председник града Београда, и познати привредник, који је дао највише средстава 1932. године за подизање Дома инжењера и техничара Србије, председници САНУ **Јосиф Панчић** и **Јован Жујовић**, **Симо Лозанић**, **Кирило Савић**, **Александар Деспич**, **Никола Хајдин** и многи други познати стручњаци и научни радници.

САДРЖАЈ РАДА

Савез инжењера и техничара Србије је добровољна, невладина, непрофитна, стручно-научна, интересна, професионална и ванстраначка организација инжењера и техничара и њихових организација у Републици Србији, отворена за сарадњу са другим научно-стручним, привредним и осталим организацијама, на бази међусобног уважавања, узајамног поштовања и самосталности у раду.

Савез инжењера и техничара Србије и његове чланице се самостално финансирају и самостално финансирају своје стручне активности и издавање стручних публикација.

Циљеви и задаци СИТС-а су:

- окупљање и организовање инжењера и техничара Србије ради остваривања њихових интереса, увећања стручног знања, обезбеђења одговарајућег статуса у заједници, на бази њиховог стручног доприноса у

привредном, економском, научно-технолошком и укупном развоју Републике Србије;

- обједињавање, јачање и омасовљавање инжењерско-техничарских организација Србије, развијање међусобне сарадње и сарадње са одговарајућим међународним организацијама инжењера и техничара;
- побољшавање статуса, интереса, угледа и заштите чланова инжењерско-техничарске организације Србије и пружање помоћи својим члановима и чланицама;
- развијање свих облика сарадње са другим домаћим и иностраним инжењерским организацијама и асоцијацијама
- пружање помоћи инжењерима и техничарима у научном и стручном усавршавању и организовању одговарајућих облика перманентног образовања;
- праћење савременог развоја технике и технологије и указивање на токове збивања и промене у овој области и давање мишљења о оптималности техничких и технолошких решења при привредним, инвестиционим и другим подухватима;
- неговање и развијање етике инжењерско-техничарског позива, људских права и слобода;
- подстицање, организовање научно-стручних скупова, објављивање научних и стручних радова, издавање часописа и других публикација од интереса за инжењерско-техничарску организацију и техничку интелигенцију;
- организовање конгреса од значаја за струку, који је скуп инжењера и техничара Србије, на коме се разматрају најзначајнија питања из делокруга рада инжењерско-техничарске организације Србије, развоја привреде, науке, технике и образовања. Конгрес се одржава у складу са могућностима и потребама, о чему одлуку доноси Скупштина СИТС;
- организовање скупова, семинара, курсева, стручних обилазака, изложби, округлих столова и јавних расправа од интереса за локалне самоуправе и за привредне, образовне и здравствене институције;
- организовање континуалне едукације за инжењерске, здравствене и образовне организације у сарадњи и у складу са критеријумима меродавних државних и других институција;
- рад на техничкој регулативи (законима, прописима и стандардима), обезбеђујући њену савременост, адекватност, актуелност и функционалност, а посебно на осавремењавању регулативе за локалне самоуправе;
- разматрање и давање стручних мишљења о програмима, плановима, пројектима, анализама и другим актима важним за развој технике, технологије и производње у Републици Србији, као и судско вештачење;
- организација и одржавање стручних испита у складу са Законом;
- подстицање и помагање оних активности и иницијатива усмерених ка очувању животне средине, водних ресурса и уређењу простора, уштеди и рационализацији потрошње свих врста енергије;

- сарадња са одговарајућим стручним, привредним и другим организацијама и органима на реализацији задатака од заједничког интереса;
- неговање сећања на значајне личности и догађаје из историје инжењерско-техничарских струка, науке и дисциплина;
- управљање Домовима и осталом имовином, извршавање општих, административних, стручних, рачуноводствено-финансијских, техничких и других послова преко Стручне службе Савеза инжењера и техничара Србије у свом интересу, интересу чланова, чланица, запослених и друго.

Савез и чланице Савеза имају развијену сарадњу са органима локалне самоуправе, одговарајућим градским и републичким министарствима и другим органима, Српском академијом наука и уметности, Инжењерском комором Србије, Инжењерском академијом Србије, Привредном комором Србије, са многим предузећима, привредним и стручним асоцијацијама, факултетима и универзитетима и многим другим институцијама. Имамо развијену и одговарајућу међународну сарадњу.

Савез већ дуги низ година, на основу Закона и уговора са надлежним републичким министарствима, организује и спроводи послове одржавања стручних испита из области инжењерских струка у Републици Србији.

Савез инжењера и техничара Србије – СИТС, данас има више хиљада својих чланова, 45 својих чланица у Србији, и то: 27 чланица на републичком нивоу, струковних савеза различитих инжењерских струка, (архитектура, урбанизам, грађевина, машинство, електротехника, рударство, геологија, геодезија, агрономија, шу-марство, хемија и др.), 18 колективних чланице савеза на покрајинском, градском и регионалном нивоу.

Савез је оснивач ИАС – Инжењерске академије Србије. У оквиру Савеза формиран је у 2002. години Развојни центар СИТС-а који ангажује наше научнике и стручњаке на решавању многих текућих и развојних садржаја из области привреде Србије.

Поред бројних периодичних публикација, редовно излази више стручних часописа, међу којима: „Техника“, „КГХ“ (Климатизација, грејање, хлађење), „Изградња“, „Процесна техника“, „Шумарство“, „Текстилна индустрија“, „Форум“, „Ecologica“, „Заштита материјала“, „Грађевински материјали и конструкције“, „Водопривреда“ и други.

Савез има своју покретну и непокретну имовину (Домове инжењера у Београду), самостално се финансира, редовно измирује своје обавезе према свим надлежним државним органима и својим добављачима и успешно послује.

Савез инжењера и техничара Србије, као национална инжењерска организација Србије, члан је међународних организација, и то ENGINEERS EUROPE – Инжењери Европе асоцијације која окупља инжењере и њихова удружеља из 33 земље Европског образовног подручја.

Корени су давно постављени и евидентни су резултати пређашњег рада. Налазећи инспирацију у прошлим временима сагласно многим и великим променама у свету, а посебно у техници и технологији, Савез инжењера и техничара Србије и његове чланице у континуитету иновирају свој рад, од интереса за своје чланове, своје чланице, грађане и државу Србију.

САДРЖАЈ

Гордана Кокеза

Зелена економија као нова развојна филозофија 11

Мијодраг Милошевић, Илија Ђосић

**Одржива циркуларна економија вођена технологијама
Индустрије 4.0**..... 20

Мирјана Костић, Ђорђе Јанаћковић, Петар Ускоковић

**Употреба јонских течности за растварање целулозе: одржива
валоризација целулозног отпада**..... 28

Исак Карабеговић

**Унапређење иновативности и конкурентности у Немачкој,
Јапану и Кини анализом примјене роботике као технологије
Индустрије 4.0 у производној индустрији** 38

*Александра Чавић, Миљан Шуњевић,
Марко Царић, Мирјана Војиновић Милорадов*

**Циркуларна и зелена економија, адаптивни механизми
управљања у Лабораторији за екологију и заштиту животне
средине** 52

Дарко Андрић, Марина Кајтез, Предраг Којић

**Искоришћавање енергије из отпада од хране у Београду кроз
анаеробну дигестију**..... 58

Милош Рајковић, Спасоје Белошевић

**Циркуларна економија у пољопривреди: технологија
анималних производа**..... 67

*Василије Петровић, Милан Николић, Guoxiang Yuan, Yiqin Yang,
Roohollah Bagherzadeh, Драган Ђорђевић, Анита Милосављевић,
Данка Ђурђић, Александар Ђурић*

**Индустрија 4.0 у циркуларној економији на примеру текстилне
индустрије** 81

Ивана Микавица, Драгана Ранђеловић, Јелена Мутић

**Загађење микропластиком: извори, редукција и
ремедијација** 91

Јелена Ивановић, Васо Манојловић Мирослав Сокић

**Одржива производња у електролучним пећима користећи
принципе Индустије 4.0 102**

*Димитрије Стевановић, Милица Каранац, Марина Илић,
Саша Милетић*

**Летећи пепео из термоенергетских постројења на угаљ и
његова примена – корак ка зеленој градњи..... 110**

ОДРЖИВА ПРОИЗВОДЊА У ЕЛЕКТРОЛУЧНИМ ПЕЋИМА КОРИСТЕЋИ ПРИНЦИПЕ ИНДУСТРИЈЕ 4.0

SUSTAINABLE PRODUCTION IN ELECTRIC ARC FURNACES USING PRINCIPLES OF INDUSTRY 4.0

ЈЕЛЕНА ИВАНОВИЋ¹, ВАСО МАНОЈЛОВИЋ²,
МИРОСЛАВ СОКИЋ³

Резиме: Користећи принципе Индустије 4.0 и циркуларне економије, у овој студији користи се метода машинског учења код процеса топљења челичног отпада у електролучним пећима ради одрживе производње челика. Фокусира се на балансирање материјалне и енергетске ефикасности, посебно на управљање деградације елемената као што су манган и силицијум. Поред тога, овај приступ ублажава ограничења рециклирања ефективним смањењем акумулације бакра и калаја у крајњем производу, чиме се побољшава његов укупни квалитет. На тај начин, не само да се оптимизује ефикасност процеса, већ се доприноси и смањењу угљеничног отиска индустрије челика, усклађујући се са глобалним тежњама ка декарбонизацији и унапређењу одрживе производне праксе.

Кључне речи: електролучна пећ, угљенични отисак, циркуларна економија

Abstract: Employing Industry 4.0 and circular economy principles, this study leverages machine learning in Electric Arc Furnaces steel waste recycling to enhance sustainable steel production. It focuses on balancing material and energy efficiency, particularly managing degradation elements like Mn and Si. In addition, the approach mitigates recycling limitations by effectively reducing the accumulation of Cu and Sn in the end product, thus enhancing its overall quality. This approach not only optimizes the process efficiency but also contributes to the reduction of the steel industry's carbon footprint, aligning with global decarbonization efforts and advancing sustainable manufacturing practices.

Key Words: EAF, carbon footprint, circular economy

1. Увод

Глобална индустрија челика, саставни део економског развоја и инфраструктуре, тренутно се бори са значајним еколошким изазовима. Ова индустри-

¹ Јелена Ивановић, Универзитет у Београду, Технолошко металуршки факултет, Карнегијева 4, Београд

² Васо Манојловић, Универзитет у Београду, Технолошко металуршки факултет, Карнегијева 4, Београд

³ Мирослав Сокић, Институт за технологију нуклеарних и других минералних сировина, Булевар Франше д'Епераа 86, Београд

ија даје велики допринос глобалној емисији угљендиоксида, чинећи отприлике 7-9% укупне светске емисије. Ово је додатно повезано са значајном потрошњом енергије у индустрији, која представља 20% укупне индустријске потрошње енергије. Традиционални линеарни економски модели који преовлађују у производњи челика погоршавају ове проблеме, које карактерише приступ „узми-уради-одлажи“ доводи до прекомерне употребе ресурса и значајне деградације животне средине. Такви модели, иако су историјски ефикасни у задовољавању потражње на тржишту, сада се суочавају са бројним питањима одрживости, нарочито у светлу растуће глобалне еколошке свести и регулаторних притисака [1].

Као одговор на ове изазове, циркуларна економија се појављује као трансформативни модел, који се удаљава од традиционалних линеарних пракси. Заснован је на принципима ефикасности ресурса, рециклаже и одрживости, са циљем да се ресурси одрже у употреби што је дуже могуће, извуче максимална вредност (док су у употреби) и да се ефикасно рециклирају ови производи и материјали на крају њиховог радног века. Овакав модел има значајан потенцијал за секундарну индустрију челика, у којој се годишње произведе у просеку 160 милиона тона челика само на више од 500 локација у Европској унији. Ова индустрија се суочава са све већим трошковима и проблемима у погледу квалитета због разноврсности материјала и све лошијег квалитета челичног отпада [1].

Технологије Индустрије 4.0, укључујући Интернет ствари (ИоТ), вештачку интелигенцију (АИ) и аналитику великих података, представљају револуционарне могућности да се примене принципи циркуларне економије у производњи челика. Коришћењем ових напредних технологија, индустрија може да пређе на одрживије праксе. Ове технологије омогућавају прецизнију контролу и оптимизацију параметара процеса, решавајући сложеност процеса производње челика који се традиционално у великој мери ослањао на искуство оператера. На пример, у електролучним пећима, технике машинског учења су показале добре резултате код постизања материјалне и енергетске ефикасности. На тај начин оптимизује се коришћење ресурса, који играју кључну улогу у смањењу угљеничног отиска код производње челика, усклађујући се са глобалним напорима за декарбонизацију, стварајући пут одрживијој, ефикаснијој и економски одрживој индустрији челика [1-3].

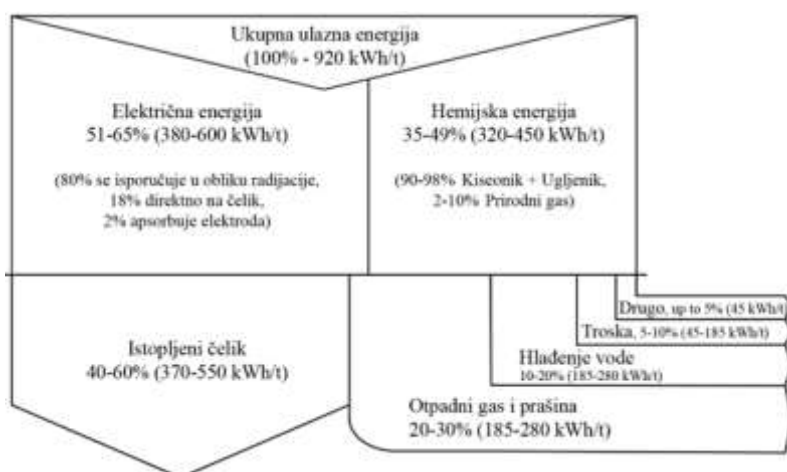
2. Методе

2.1. Услови топљења у електролучној пећи

За прорачун су узети реални подаци код топљења у пећи капацитета 60 тона течног челика са трансформатором капацитета 60 MVA. Пречник металне купке (D) је 4.100 mm, а дубина (X) је 920 mm. Типичан однос D/X је релативно мали у поређењу са конвенционалним односима од 4,8 до 6,2 и повезује се са топлотом радијације, енергетским губицима кроз хлађење водом и утицајем на

реакцију интензитета између троске и челика. Електроде су типа ултра високе снаге и контролишу се аутоматски са одвојеним системом за контролу.

Укупна улазна енергија састоји се од електричне и хемијске, при чему око половина одлази на топљење отпадног материјала, а 25-30% одлази на гасове и праšину (слика 1). Хемијска енергија се добија од природног гаса, реакцијом кисеоника са угљеником и других егзотермних реакција. Гас унутар пећне коморе се састоји углавном од угљен-моноксида и угљен-диоксида. Након напуштања коморе, угљен-моноксид прелази у угљен-диоксид, при чему се ослобађа значајна количина топлоте. Ова топлота може да се искористи за предгревање улазног материјала или за третман отпадне праšине која је богата елементима као што су цинк и олово.



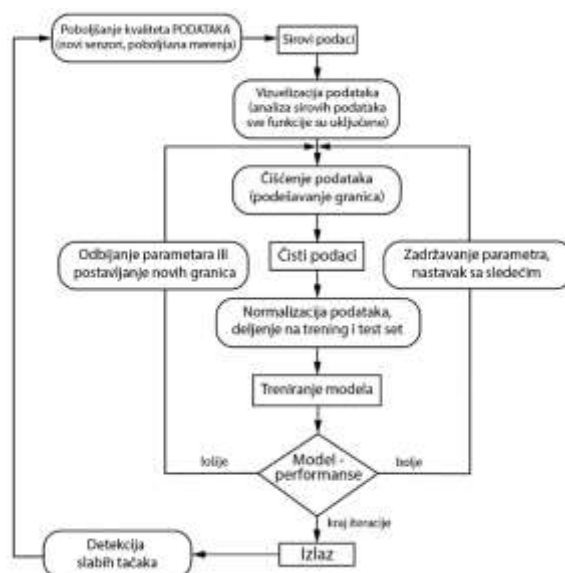
Слика 1. Енергетски и материјални токови у електролучној пећи

Улазни материјал за електролучну пећ је мешавина челичних отпада различитог квалитета, насипних густина и односа површина/запремина. Облик и састав отпада утиче на пренос топлоте унутар пећи, а тиме и на укупну потрошњу електричне енергије. Отпад се шаржира у корпама тако што се отпад релативно велике насипне густине (нпр. ливени лом) поставља на дно како би се убрзао пренос топлоте од топле купке према отпаду. Отпад релативно ниске насипне густине (нпр. лим) се поставља на врху корпе, тако да овај отпад долази директно у додир са електричним луком, апсорбује енергију зрачења и брзо се топи. Након топљења отпада, течан челик се испушта и оставља око 5-10% течног метала од укупног капацитета пећи због лакшег топљења новог отпада, чиме се смањује укупна потрошња енергије. Корпе за шаржирање су од 10 до 30 тона, време шаржирања по корпи је око пет минута. Шаржирају се две до три корпе. Време између два изливања износи око 50 минута. Типична стратегија за једно топљење је следећа: шаржирање отпада у пећ, где је остављен течан метал од претходног топљења, топљење, друго шаржирање, топљење, треће шаржирање, топљење, рафинација, подешавање температуре и редукација и изливање. Стратегија за топљење отпада такође

утиче на потрошњу енергије, а губици су најчешће везани за прекиде у раду, који могу настати услед различитих фактора као што су припрема изливника, ватросталних материјала, проблема са шаржирањем и сл. Као додатни материјали у пећи се додају кокс и креч који утичу на састав и пенушање троске. Пенушава троска има вишеструке доприносе код процеса топљења у електролучној пећи, као што су: контрола оксидације и редукције железа, угљеника, нечистоћа, чување ватросталног материјала од зрачења електричног лука и побољшање преноса енергије од електричног лука до челика.

2.2. Подаци и методе машинског учења

Подаци коришћени за овај пример су прикупљани током пет година (од 2015. до 2020.), са око 14.800 топљења (улаза), при чему су праћена 42 параметра процеса. Квалитет података је један од основа критеријума за побољшање перформанси модела машинског учења. Алгоритам за побољшање квалитета и управљање подацима дат је на слици 2.



Слика 2. Алгоритам за побољшање квалитета података и перформанси модела машинског учења

Визуализација података се врши увођењем пакета „seaborn“ у „Jupyter“ окружењу. Након почетног постављања граница и чишћења података, подаци се нормализују на скали од 0 до 1 и деле се на два сета тренинга и теста. Тест сет је подешен да буде 10% од укупног скупа података, што је веома битно јер се на тај начин проверавају перформансе модела машинског учења на податке за који модел није обучен, односно проверава се проценат одступања предвиђања модела између два сета. Ако је одступање модела перформанси изражено, поређењем тренинга и тест сета, потребно је подесити параметре модела или даље манипулисати подацима ради побољшања перформанси. Дати сет података садржи 42 параметра који могу да уђу у модел, тако да се

бирају најутицајнији параметри: подешавају се иницијални параметри модела и проверава тачност модела коришћењем неких од метрика. Најчешће коришћени метрици за мерење перформанси модела су: коефицијент корелације (P2), средњи квадрат грешке (PMSE), метрика средње апсолутне грешке (MAE), максимална апсолутна процентуална грешка (MAPE). У овом примеру коришћени су најрелевантније технике анализе машинског учења (модели): „Support vector machine“ (SVM), „Random Forest“ (RF), „XGBoost“ (XGB) и „Artificial Neural Network“ (ANN) [4].

Након иницијално добијених перформанси модела, према алгоритму са слике 2, поступак итерације се понавља ради даљег побољшања: постављају се нове границе или се одбацују параметри који су улазили у модел. Уколико се испостави да се добијају боље перформансе модела, испитивани параметар се чува са постављеним границама и прелази се на следећи. На крају итерација, одабрана су 24 утицајна параметра процеса за тренинг модела машинског учења, тренинг сет садржи 10.521, а тест сет 1.169 улаза (топљења).

Циљ модела је да се предвиди потрошња електричне енергије по тони произведеног челика, потрошња мангана и силицијума, расподела појединих елемената и нечистоћа у челику (као што су бакар и калај) у зависности од промене изабраних процесних параметара. Такође је могуће изабрати и друге циљеве предвиђања модела, као што су оперативно време електролучне пећи или искоришћење челика (процентуални однос масе добијеног челика и металне шарже). Пошто циљ зависи од многих међусобно повезаних параметара, PDP и SHAP су коришћени за визуелизацију и проналажење квантитативних односа између параметара процеса и циљева модела [4].

3. Резултати и дискусија

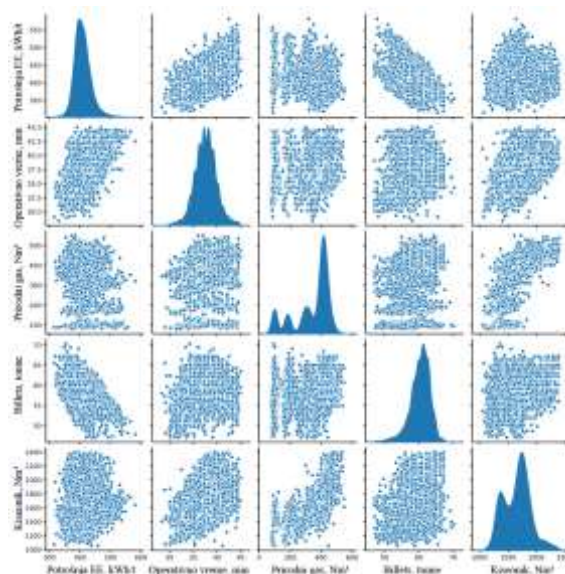
Решавање проблема оптимизације процеса топљења у електролучној пећи генерално се може поделити на симулацију и оптимизацију коришћења физичко-хемијских модела и коришћење статистичких модела. Физичко-хемијски модели се ослањају на појаве које се описују физичким законима и хемијским реакцијама који су добро проучени и јасно дефинисани. Међутим, недостатак код ових модела је утицај различитих фактора који се јављају у реалним условима, тако да је неопходно поставити бројна ограничења, поједностављења и претпоставке. Са друге стране, статистички модели користе податке из реалних услова, што омогућава да се избегну претпоставке и поједностављења у изванредно сложеним и динамичким условима који се јављају код топљења отпада у електролучним пећима. Главна предност статистичких модела је свеобухватна анализа свих параметара процеса. Основни недостатак је квалитет података који се користе за ове моделе. Квалитет података зависи пре свега од прецизности и броја сензора којима се мере процесни параметри. Осим тога, у литератури се за статистичке методе каже да су површне и нејасне, јер не узимају у обзир физичко-хемијске процесе, па се упоређују са црном кутијом. Међутим, за инжењера који добро познаје процес, добијањем корелације између појединих параметара процеса коришћењем статистичких

метода, може се добити дубља анализа и квантификовати утицај појединих параметара.

Поступак управљања подацима почиње анализом и визуелизацијом сирових података. На овај начин се идентификују, а постављањем граница за сваки параметар уклањају се неправилности и одступања у сировим подацима (слика 1) Потрошња електричне енергије кретала се од 320 до 550 kWh/т произведеног челика. Показало се да методе RF и XGBoost имају најбоље метричке показатеље на тренинг сету код предвиђања потрошње електричне енергије. Међутим, када се модели провере на тест сету, SVM показује најбоље перформансе (табела 1).

Табела 1. Поређење резултата различитих метода машинског учења

Модел	Метрике				
Тренинг	MAE	R ²	RMSE	MAX	MAPE
SVM – rbf	6,17	0,904	8,37	61,0	0,0150
RF	2,51	0,984	3,39	33,5	0,0061
XGBoost	1,89	0,991	2,55	13,8	0,0046
ANN	5,73	0,921	7,60	56,3	0,0152
Тест	MAE	R ²	RMSE	MAX	MAPE
SVM – rbf	6,37	0,901	8,36	48,2	0,0155
RF	6,83	0,888	8,94	39,3	0,0165
XGBoost	6,63	0,894	8,64	42,0	0,0161
ANN	6,62	0,897	8,60	46,4	0,0160

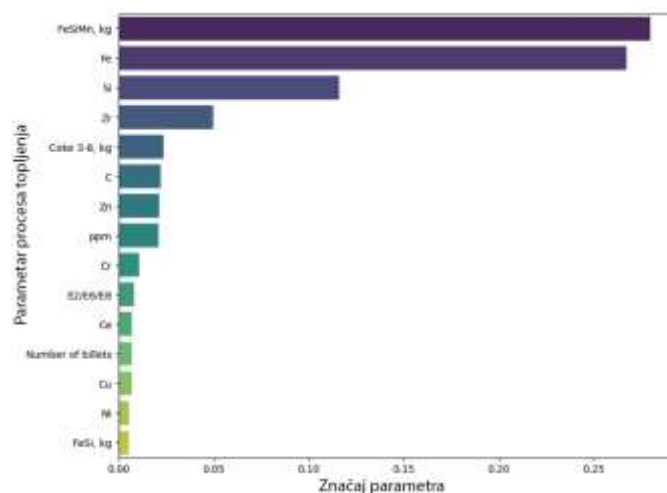


Слика 3. Пример приказа података и корелације параметара након чишћења и постављања граница на сировим подацима

Интеграција предиктивних метода машинског учења у електролучним пећима представља пример преласка са традиционалних метода производње челика на интелигентне операције засноване на подацима. Омогућавањем подешавања параметара процеса у реалном времену на основу предиктивне аналитике, ови модели значајно повећавају енергетску ефикасност. На пример, рационална употреба улазних материјала и фино подешавање оперативних параметара, засновано на предиктивним моделима, не само да смањује потрошњу енергије већ и одржава квалитет произведеног челика. Таква прецизност у управљању потрошњом електричне енергије директно доприноси смањењу еколошког отиска индустрије челика, усклађујући се са принципима циркуларне економије минимизирања отпада и еколошког утицаја.

Код процеса производње челика, посебно у електролучним пећима (ЕАФ), управљање деградацијом материјала подједнако је важно као и уштеда електричне енергије. Прелазак елемената, као што је манган, у шљаку током процеса производње челика представља пример деградације важне и вредне сировине (фероманган се користи за долегирање и дезоксидацију челика).

Увидом из анализе машинског учења, на слици 4, показано је да употреба кокса, феро-силицијум-мангана (FeSiMn), као и елемената гвожђа (Fe) и силицијума (Si) има значајан утицај на прелазак Mn у шљаку, као што је и очекивано. Са друге стране, значајан је утицај и цирконијума (Zr), чији је допринос преласку мангана мање изучаван у литератури. Ови резултати указују на сложену интеракцију различитих параметара у процесу производње челика, побољшавајући наше разумевање овако сложених процеса.



Слика 4. Параметри процеса у електролучној пећи који утичу на прелазак мангана у троску

Присуство и понашање вредних елемената као што су Mn и Si су кључни за одржавање квалитета и интегритета коначног челичног производа. Насупрот томе, све веће присуство нечистоћа као што су бакар (Cu) и калај (Sn) у

ланцу рециклаже представља значајан изазов за модел циркуларне економије у производњи челика. Ови елементи, када су присутни у већим концентрацијама, могу деградирати механичка својства челика, смањујући на тај начин његов квалитет и употребну вредност. Овај тренд акумулације нечистоћа током узастопних циклуса рециклаже угрожава одрживост и ефикасност која се постиже циркуларном економијом.

Решавање ових изазова захтева дубљи приступ који превазилази обим овог рада, са циљем балансирања између задржавање вредних елемената у челику (Mn, Si) са истовременим уклањањем штетних примеса (Cu, Sn).

4. Закључак

Примена машинског учења код оптимизације процеса електролучних пећи, посебно у оквиру принципа Индустрије 4.0, представља значајан напредак у одрживој производњи челика. Из резултата приказаних у овом раду, показана је сложена повезаност параметара процеса производње челика и њихов утицај на потрошњу електричне енергије и на прелазак елемената попут мангана и силицијума у троску. Анализом и предвиђањем понашања различитих параметара у различитим условима процеса, могуће је оптимизовати истовремено искоришћење материјала и уклањање нечистоћа. Овај приступ не само да је у складу са циљевима циркуларне економије, већ такође обезбеђује производњу квалитетног челика, чиме се одржава и вредност материјала у производном циклусу. Како индустрија челика наставља да се развија под утицајем технологија Индустрије 4.0, аналитичке методе обраде процесних података постају све важније у постизању еколошке одрживости и економске ефикасности.

5. Литература

- [1] Manojlović, Vaso, Željko Kamberović, Marija Korać, and Milan Dotlić. Machine learning analysis of electric arc furnace process for the evaluation of energy efficiency parameters. *Applied Energy* 307 (2022): 118209.
- [2] Zhang, Runhao, and Jian Yang. State of the art in applications of machine learning in steelmaking process modeling. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials* 30, no. 11 (2023): 2055-2075.
- [3] Zhang, Song, Dewen Jiang, Zhenyang Wang, Feiwang Wang, Jianliang Zhang, Yanbing Zong, and Shuigen Zeng. Predictive Modeling of the Hot Metal Sulfur Content in a Blast Furnace Based on Machine Learning. *Metals* 13, no. 2 (2023): 288.
- [4] Forootan, Mohammad Mahdi, Iman Larki, Rahim Zahedi, and Abolfazl Ahmadi. "Machine learning and deep learning in energy systems: A review. *Sustainability* 14, no. 8 (2022): 4832.