



ЗБОРНИК РАДОВА
Годишње конференције Научног друштва
Србије - ГОДКОН 2024.

Београд, 2026.

ЗБОРНИК РАДОВА

Годишње конференције Научног друштва Србије - ГОДКОН 2024.

Рецензенти:

Проф. др Јован Васиљевић,
Проф. др Владимир Стевановић,
Проф. др Катица Хедрих (Стевановић),
Проф. др Бранислав Ђорђевић,
Проф. др Слободан Апостолски,
Проф. др Душан Велимировић,
Проф. др Миодраг Орлић,
Проф. др Весна Мишковић-Станковић,
др Жељко Чупић, научни саветник

Издавач

Научно друштво Србије
kontakt@nds.edu.rs

За издавача:

Проф. др Владимир Стевановић, председник Научног друштва Србије

Штампа:

„PLANETA PRINT“, Виноградски венац 9/10, 11136 Београд, Србија

„СIP“ – Катаголизација у публикацији
Народна библиотека Србије, Београд

ЗБОРНИК РАДОВА

Годишње конференције Научног друштва Србије - ГОДКОН 2024.–

Београд:

(Београд: „Planeta print“). – 135 str.

24 cm.

На насл. стр. : Научно друштво Србије. –

- Тираж 70.

ISBN-978-86-906869-5-7

а) Медицинске науке б) Друштвене науке

в) Техничке науке г) Природно-математичке науке

ПРЕДГОВОР

Годишња конференција Научног друштва Србије – ГОДКОН 2024. је одржана 31. октобра и 1. новембра 2024. године у Београду, у Задужбини Илије Коларца. Пред вама је Зборник радова чланова Научног друштва Србије који су поред одржаних предавања, доставили своја излагања и у писаној форми. На Конференцији су биле заступљене све научне области Одељења Друштва: природно-математичке науке, техничке науке, медицинско-биолошке науке и друштвене науке. Сви радови су прошли рецензију Програмског одбора конференције.

Радови у Зборнику садрже резултате савремених истраживања, преглед до сада остварених научних резултата у појединим областима са њиховим утицајем на развој науке, технике и друштва и критичке анализе могућих праваца даљег стратешког развоја. Већина научних резултата домаћих аутора је остварена у оквиру пројеката који су подржани од ресорног Министарства науке Републике Србије. Надамо се да ће резултати и закључци изложених радова, као и одржана излагања и дискусије са конференције, имати утицаја на развој друштва, образовног система и науке, очување здравља становништва и животне средине и одрживи развој индустрије и привреде.

У Београду, 12.03.2026. год.

Председник Научног друштва Србије
Проф. др Владимир Стевановић

САДРЖАЈ:

1. Драгољуб Поповић, Улога судске праксе у развоју права	7
2. Слободан Апостолски: Дијабетесна неуропатија	17
3. Петар Адић: Хигс бозон: неопходност његовог постојања и откриће	27
4. Споменко Ј. Михајловић: Геомагнетска бура – шта је то?	39
5. Зоран Бојковић: Енергетска ефикасност 5Г мобилних мрежа и одрживи развој 6Г технологија	53
6. Бранислав Ђорђевић: Криза воде и шта предузимати – решења из новог просторног плана Републике Србије	63
7. Зоран Стевановић: Утицај климатских промена на доступност извора воде за пиће у свету	73
8. Милосав Георгијевић: Иновативност у Србији	83
9. Александар Јововић: Емисије гасова са ефектом стаклене баште и будућност домаће енергетике	93
10. Илија Плећаш: Радиоактивни отпад у Србији: како и где са њим?	109
11. Милан Матијевић: „Iterative learning control“ - преглед теоријских приступа и индустријске примене	115
12. Анђела Симовић и Јелена Бајат: Зелени инхибитори корозије: технолошки и научни потенцијал и изазови у Србији	129



Годишња конференција Научног друштва Србије
ГОДКОН 2024.
31. октобар – 1. новембар 2024. Београд

УЛОГА СУДСКЕ ПРАКСЕ У РАЗВИТКУ ПРАВА

Драгољуб Поповић
Универзитет Унион у Београду, Правни факултет

Анстракт

Право се развија кроз судску праксу. Суд тумачи норму, која је најчешће писана, како би је применио. Право се развија и преображава, упркос томе што текст норме може остати непромењен. Тумачење права је због тога осетљив и сложен поступак који води до примене права и постизања правде.

Примери из праксе Европског суда за људска права по члану 6 Конвенције за заштиту људских права и основних слобода показују како се право развијало иако је текст поменутог члана остао исти. У судској пракси су развијени нови појмови, проширено је поље примене норме и еволуирала су схватања самога текста.

Аутор закључује да формулацију текста правне норме коначно даје суд и да је право загонетка текста у чијим замршеним лавиринтима обитава правда.

Увод

Судска пракса је само језгро и суштински састојак правног феномена. Право је незамисливо без тумачења и суда, зато што суд својом пресудом одређује истинску садржину норме, која се иначе не може увек једноставно разабрати. У праву су зато лаици кад правницима пребацују компликовано излагање које зна да поприми облик херметичности. Право је загонетка текста, коју треба одгонетнути.

Да бисмо показали оно што тврдимо обратићемо се тексту европске Конвенције за заштиту људских права и основних слобода. Члан 6 Конвенције у првој реченици каже овако:

"Свако, током одлучивања о његовим грађанским правима и обавезама или о кривичној оптужби против њега, има право на правичну и јавну расправу у разумном року пред независним и непристрасним судом, образованим на основу закона."

Текст одредбе се односи се на појединца који се налази пред судом и учествује у расправи, било да је оптужен или да води спор о својим правима и обавезама. Читање самога текста неће нам међутим, омогућити да тачно увидимо о чему ће овде бити говор. Обратимо се зато случају *Голдер против Уједињеног Краљевства* који је давне, 1975. године, пресудио Европски суд за људска права, орган који примењује Конвенцију о којој је реч.¹

Голдер против Уједињеног Краљевства

Голдер је био на издржавању казне лишења слобода у Енглеској. У казненом заводу је избила побуна, па га је један од затворских чувара означио као учесника тог догађаја. Голдер је тврдио да у побуни није учествовао и одлучио је да тужи чувара за клевету. Да би поднео тужбу био му је неопходан контакт с адвокатом. Обратио се управи затвора захтевом да му се тај контакт омогући. Управа је међутим, одбила захтев.

Против одлуке управе затвора Голдер је министру унутрашњих послова поднео жалбу, коју је министар одбио. Исцрпевши правне лекове по националном праву Голдер је доцније поднео представку Европском суду за људска права у Стразбуру. Тврдио је да је у његовом случају повређен члан 6 Конвенције.

Језичко тумачење члана 6 Конвенције нам јасно указује на проблем с којим се Европски суд суочио у овом случају. Текст поменуте одредбе односи се на оног ко је већ пред судом и о чијим се правима или кривици одлучује. Подносилац представке је, међутим, тек имао намеру да се обрати суду у својој држави, али је у томе био онемогућен. Другим речима, у овоме случају се поставило питање да ли једно лице има право да приступи суду? Зато се Европски суд запитао да ли се путем члана 6 Конвенције пружа заштита могућности грађанина да приступи суду по домаћем праву, односно да ли постоји оно што би се могло назвати правом на приступ суду?

Текст члана 6 Конвенције заиста не помиње право на приступ суду. С друге стране опет, ако национално право спречи сам приступ суду сва заштита коју јемчи члан 6 Конвенције може постати узалудна. Због тога је ваљало

¹ Golder v. The United Kingdom, 4451/70 (1975)

тумачити текст поменуте одредбе са становишта циља који она тежи да постигне. Како ће се остварити правично суђење, ако уопште није могуће доспети пред суд?!

Европски суд за људска права је у овом случају пресудио у корист подносиоца представке, утврдивши повреду члана 6 Конвенције. Суд је при томе остао у оквиру језичког тумачења норме, истакавши како је захтев подносиоца представке обухваћен одредбом члана 6 Конвенције. То је Суд изрекао у 32-ом параграфу пресуде:

”Иако се право на правично, јавно и експедитивно суђење примењује само на поступке у току, отуд ипак не проистиче да је само покретање поступка тиме искључено.”

Европски суд за људска права је дакле у оквир, или тачније садржину, поменуте одредбе Конвенције укључио све оно што њеним текстом није било изричито искључено. Подлогу оваквом ставу представљало је логичко разматрање, које каже да, ако се приступ домаћем суду изостави из заштите члана 6 Конвенције, та заштита може постати илузорна.

У даљем развоју права на приступ суду, до којег је дошло у пракси Европског суда за људска права, поставиће се питање о домену, или обухвату тога права, тачније Суд ће бити суочен с проблемом да ли право на приступ суду у домаћем праву постоји у свим случајевима. Недоумица ће се појавити у облику питања да ли неким лицима може бити ускраћено право на приступ суду у домаћем праву, па самим тим и заштита члана 6 Конвенције у том погледу?

Поменути проблем ће са становишта члана 6 Конвенције бити разматран поводом одређења појма који смо сусрели у тексту норме. Тај појам представљају грађанска права и обавезе.

Пелегран против Француске

Одговор на питање да ли неко може бити лишен заштите члана 6 Конвенције, Европски суд је најпре дао у пресуди случаја *Пелегран против Француске* од 1999. године.² Да бисмо осмотрили начин закључивања Суда морамо се вратити у текст члана 6 Конвенције. Свако има право на приступ суду у домаћем праву, али то право се односи, према тексту норме, на заштиту ”грађанских права и обавеза”. Од дефиниције тога појма зависи приступ суду који је грађанину зајемчен. Сад је други део синтагме доведен у питање. Ако свако има право на правично суђење по члану 6 Конвенције, појединац то право има само онда кад је спор о његовим или њеним правима и обавезама.

² Pellegrin v. France, 28541/95 (1999)

У случају *Пелегран* подносилац представке био је финансијски стручњак регрутован за рад у Африци, у оквиру техничке помоћи коју је француска влада пружала владама западноафричких држава, некадашњих француских колонија. Здравственим прегледом утврђено је да стање његовог здравља не одговара климатским условима у земљама претпостављеног службовања. Због тога није могао добити одговарајуће уверење, па тиме ни место у владиној служби, каквом се надао. Повео је спор по домаћем праву, али није постигао успех. Пред Европским судом за људска права је тврдио да је у његовом случају повређен члан 6 Конвенције.

Европски суд се запитао да ли се у овоме предмету ради о грађанским правима и обавезама у смислу поменуте одредбе? Подносилац представке је био владин службеник, који је водио спор против владе своје земље. Другим речима спор је водило лице које је у јавној служби. Европски суд је решио и то је изрекао у 64-ом параграфу пресуде да прибегне уском тумачењу одредбе члана 6 Конвенције. Суд је применио мерило које је названо функционалним, зато што је засновано на природи дужности и одговорности лица запосленог у јавној служби. Лица у јавној служби учествују у вршењу власти, што подразумева јавноправна овлашћења, те на тај начин, како се Суд изразио, ”врше део суверене власти”. Због тога је Суд закључио да су једини спорови искључени из сфере заштите члана 6 Конвенције управо они које против своје државе покрену јавни службеници, којима је поверено да делују у јавном интересу. Суд је, примера ради, изреком апострофирао оружане снаге државе и полицију, као типичне службе чији припадници не могу водити спор с државом.

Правило из пресуде *Пелегран* усталило се у судској пракси. Спорови јавних службеника, зато што је овима поверена јавна власт, па тиме и један, макар мали, део вршења државне суверености, били су искључени из домена заштите члана 6 Конвенције.

Вилхо Ескелинен и други против Финске

Пресуда у случају *Пелегран* била је донета почетком децембра 1999. године. У априлу 2007. године Велико веће Европског суда донело је пресуду у предмету *Вилхо Ескелинен и други против Финске*.³ Та пресуда одступила је од правила из преседана *Пелегран*. У питању је био спор који је, против државе водила једна група полицајаца. Предмет спора биле су њихове припадности, на које су полагали право у служби. Пред домаћим правосуђем су изгубили спор, па су поднели представку Европском суду, с притужбама на повреду члана 6 Конвенције.

³ Vilho Eskelinen and Others v. Finland, GC, 63235/00 (2007)

Финска влада се у одговору на представку позвала на правило из пресуде *Пелегран*, наводећи како подносиоци представке обављају јавну службу, те следствено њихов спор не може уживати заштиту члана 6 Конвенције. Велико веће суда је опсежно, у више параграфа пресуде подвргло анализи ранију судску праксу, која је претходила случају *Пелегран*, као и правило из тога преседана. Закључило је како примена функционалног мерила из пресуде *Пелегран* може довести до резултата који представљају аномалију, те је стало на гледиште да правило из пресуде *Пелегран* и мерило које то правило садржи треба преиспитати и развити у пракси.

На основу оваквог приступа проблему, Суд је одлучио у корист подносилаца представки, а у 62-ом параграфу пресуде поставио је правило које се односи на домен примене члана 6 Конвенције:

"Да би одговорна држава, с позивом на статус подносиоца представке, могла да искључи примену члана 6 Конвенције неопходно је испунити два услова. Први је да је национално право изричито искључило могућност приступа суду за одређено место или категорију запослених. Други је услов да се такво искључење (приступа суду) може оправдати објективним разлозима у корист државног интереса."

Могло би се тврдити како је од установљавања правила постављеног пресудом *Ескелинен* изостанак заштите коју јемчи члан 6 Конвенције постао изузетак. Практично посматрано, свако ко води спор пред домаћим судом може уживати заштиту члана 6 Конвенције. Ако поглед управимо норми тога члана, коју смо на почетку навели, рекло би се да правило из пресуде *Ескелинен* не само да се налази у оквиру језичког тумачења члана 6 Конвенције, него је с таквим тумачењем више у складу од режима какав је донела пресуда *Пелегран*.

Да би правило из пресуде *Пелегран* нашло примену и искључило заштиту члана 6 Конвенције било је неопходно одступање од универзалности субјекта и увођење посебног појма - дужност верности и лојалности - који члан 6 не познаје у изворном облику. Добија се зато утисак да је напуштањем тога правила норма враћена у калуп сопственог предлошка, какав представља њен текст. У присуству правила из преседана *Ескелинен* ниједна група или класа подносилаца представки није лишена заштите члана 6 аутоматски, због неког својства, као што је раније био случај с онима који држави дугују посебну верност.

Аутоматизам ранијег изузетка удаљавао се на неки начин од текста, што је новим правилом било напуштено. Универзалност субјекта норме, изражена општом, неличном, именичком заменицом, била је пресудом *Ескелинен* враћена - сви уживају заштиту поменуте одредбе Конвенције. Држава потписница Конвенције једино има могућност да у своме националном праву уведе начелно искључење заштите, али такав изузетак мора правдати ваљаним разлозима.

Бака против Мађарске

Размотримо за тренутак норму о приступу суду по националном праву како нам се указује у свом, ако се може рећи, јуриспруденцијалном облику. Почев од пресуде *Ескелинен* Европски суд захтева да изостанак приступа суду почива на два услова. Најпре, држава потписница Конвенције мора приступ суду начелно и изричито искључити по домаћем праву. Осим тога, то искључење мора бити правдано ваљаним разлозима, који се заснивају на државном интересу. Ови услови су кумулативно постављени.

У случају *Бака против Мађарске*, од 2016. године, Европски суд је управо био позван да одлучи јесу ли у конкретном предмету испуњени услови постављени пресудом *Ескелинен*. Подносилац представке, Андраш Бака је био председник Врховног суда Мађарске, кад је уставним законом од априла 2011. године Врховном суду враћено традиционално име - Курија. На основу измењеног законодавства Парламент је изабрао новог председника највишег суда у земљи у новембру исте године, тако да је функција ранијег председника превремено окончана 1. јануара 2012. године. Судија Бака је поднео представку Европском суду жалећи се на повреду члана 6 Конвенције.⁴ Навео је да га је закон лишио приступа суду по националном праву, јер није могао да се било којим правним средством супротстави превременом престанку функције коју је обављао.

Мађарска влада је у одговору на представку заузела становиште како је тешко замисливо да закон државе потписнице Конвенције предвиди норму о искључењу приступа суду за мере које очигледно и неспорно не подлежу судској контроли. Таква мера је именовање или избор председника највишег суда у земљи. У погледу другог услова влада је истакла како је функција коју је обављао подносилац представке установљена јавним правом и повезана с општим државним интересима.

Занимљиво је приметити да се влада на усменој расправи пред судом упустила управо у језичко тумачење правила из пресуде *Ескелинен*. Владин заступник је тврдио како је други услов садржан у правилу из преседана *Ескелинен* у суштини само преформулисан текст правила из пресуде *Пелегран*, које заштиту члана 6 Конвенције ускраћује депозитарима јавне власти, зато што штите интересе државе.

Резоновање Великога већа Европског суда, које је у овоме предмету донело пресуду, о испуњености услова из надлежног преседана заслужује пажњу. Није довољно, закључило је Велико веће, да предмет спора буде посебна веза поверења и оданости између једног лица, које је у јавној служби и државе. Потребно је да таква веза у конкретном случају буде доведена у

⁴ Baka v. Hungary, GC, 20261/12 (2016)

питање. Неопходно је, осим тога и да одговорна држава то докаже. По схватању Европског суда постоји претпоставка применљивости члана 6 Конвенције. Како би оборила претпоставку држава мора доказати да носилац јавне власти начелно нема приступ суду у домаћем праву и да је таква ситуација искључења од приступа суду оправдана објективним разлозима. Примењујући овакав приступ Велико веће је утврдило да постоји повреда члана 6 Конвенције.

Европски суд је у образложењу свога става навео како је подносиоцу представке функција престала на основу прелазних одредаба закона. Анализирајући ситуацију створену уставним законом који је ступио на снагу 1. јануара 2012. године, Европски суд је нашао да је искључење заштите по домаћем праву, односно искључење приступа домаћем суду, настало истовремено са законодавчевим задирањем у права подносиоца представке. Искључење приступа суду по домаћем праву мора поштовати начело владавине права, а то уз остало значи да мора бити предвиђено, како бисмо ми казали, општом нормом (*an instrument of general application* у енглеској верзији текста параграфа 117 пресуде, односно *un instrument d'application générale* у француској). У овом случају је међутим, то било учињено појединачном нормом која се налази међу прелазним одредбама закона.

Због тога је Велико веће Суда закључило да први услов из правила садржаног у преседану *Ескелинен* није испуњен у овом случају. Како су два услова из правила тога преседана постављена кумулативно Велико веће је одлучило да нема потребе разматрати испуњеност другог услова и одлучило да постоји повреда права на приступ суду по члану 6 Конвенције.

Две околности се истичу кад се пресуда у случају *Бака* посматра у перспективи развитка судске праксе. Најпре, та пресуда сведочи о применљивости преседана *Ескелинен* на спорове које имају судије. Осим овога, пресуда у случају *Бака* је од посебног значаја због тога што је нагласила да делатност државе кад поставља ограничење приступа суду у домаћем правном поретку мора поштовати начело владавине права. Национални законодавац не може доносити норме какве хоће, него напротив мора поштовати принципе по којима је устројена савремена демократија.

Гжеда против Пољске

У једном предмету који је Европски суд за људска права пресудио у марту 2022. године поставила су се питања попут оних које смо сусрели разматрајући пресуду *Бака*. Био је то случај *Гжеда против Пољске*.⁵ Поново су се пред Судом нашли право на приступ суду, тумачење одредбе члана 6 Конвенције,

⁵ Grzeda v. Poland, GC, 43572/18 (2022)

примена правила из преседана *Ескелинен*, речју читав низ питања која се односе на обим и развитак норме члана 6 Конвенције.

Подносилац представке, Јан Гжеда, судија Врховног Управног суда у Пољској је у јануару 2016. године био изабран за члана Националног савета правосуђа, тела које по Уставу штити независност судства и уз остало предлаже појединце за именовање у судијско звање. Мандат чланова тога тела је четири године. За време трајања мандата подносиоца представке измењен је, у децембру 2017. године, закон о Националном савету правосуђа. Законска измена окончала је мандат чланова тога тела пре истека рока на који су били изабрани.

Обративши се Европском суду подносилац представке је изнео притужбу по члану 6 Конвенције. Тврдио је да му је мандат у Националном савету правосуђа арбитрерно и превремено окончан, а да му је истовремено запречен пут до правде. Није му био омогућен приступ суду у смислу члана 6 Конвенције, зато што није имао на располагању било какво правно средство којим би се супротставио ранијем окончању свога мандата. Он није могао поднети уставну жалбу због тога што му мандат није окончан појединачним актом, него управо по слову самога закона, док се уставна жалба може поднети само против конкретног, појединачног акта.

Одговорна влада је тврдила да овај случај треба разликовати од предмета *Ескелинен*, као и од предмета *Бака* зато што су подносиоци представки у тим предметима били запослени. Они су имали спорове који су се односили на њихову службу. Судија Гжеда, с друге стране, није поднео представку поводом спора који је настао у његовој судијској служби, него због окончања мандата у Националном савету правосуђа. Отуд је, по ставу одговорне владе било неопходно разликовање.

На овоме месту се сусрећемо с оном техником судског закључивања, коју Англосаксонци зову *разликовање/distinguishing*. При разликовању се суд пита да ли у чињеничном склопу предмета који треба да пресуди постоји елемент, који је друкчији у односу на чињенице из раније пресуђеног случаја. Ово међутим, није довољно; суд иде даље и упушта се у оцену да ли тај различити елемент чињеничног стања има толику снагу да оправдава различиту одлуку у односу на ранију пресуду. Ако је одговор на друго питање потврдан, суд може одступити од преседана. По себи се разуме да такво одступање мора бити опсежно образложено и темељно поткрепљено аргументима.

Подносилац представке је у реплици истакао да први услов за примену правила из пресуде *Ескелинен* није испуњен - пољско право није изричито и начелно искључило заштиту члана 6 Конвенције за неку класу лица. Осим тога, по његовом схватању, чак и да је тај први услов испуњен, недостајало би испуњење другог услова из напред поменутог преседана. Искључење од

приступа домаћем суду није било објективно утемељено и противречило је начелу владавине права.

Велико веће Европског суда је најпре заузело становиште против разликовања овог предмета од случаја *Бака*. Иако спор није настао поводом запослења подносилац представке ипак ужива заштиту члана 6 Конвенције, био је закључак Великог већа. Чланство у независном телу, предвиђеном Уставом, представља по својој суштини вршење јавне службе и право на њено вршење постоји по правном поретку одговорне државе. Подносилац представке није тражио да му се конституише какво право, него да му се омогући вршење права које има.

Утврдивши да други услов за примену правила из пресуде *Ескелинен* није испуњен, суд се није бавио питањем је ли испуњен први услов за примену тога правила. Велико веће је наиме, навело да одговорна влада уопште није објаснила због чега у овом случају није потребна правна заштита, те следствено ни зашто је подносиоцу представке ускраћен приступ домаћем суду. Уместо тога влада се једноставно позивала на чињеницу да таква заштита није предвиђена домаћим правом.

У случају судије Гжеде мандат члановима Националног савета правосуђа окончала је појединачна норма, која се односила на петнаест тачно одређених лица, чланова поменутога тела. Због тога је, као и у пресуди случаја *Бака*, Европски суд изрекао да се национални законодавац мора кретати у границама постављеним начелом владавине права и утврдио повреду члана 6 Конвенције.

Закључак

Посматрали смо развитак одредбе члана 6 Конвенције пре свега са становишта права на приступ суду. Норма је доживела обликовање у судској пракси. Ово се односи на обим примене одредбе, на развитак појединих установа које утичу на тај обим, као и на развитак тумачења текста који представља предлог норме. Текст је остао исти, али се право променило.

У погледу обима примене члана 6 Конвенције дошло је до ширење поља примене те норме. Европски суд је двоструком негацијом у то поље укључио ситуацију коју текст није предвидео; премда је није ни изреком изоставио. Развитак установа је упознао засебну еволуцију, која у великој мери стоји у вези с правом на приступ суду.

Значење текста одредбе члана 6 Конвенције, који никад није измењен, упознало је развитак. Право је доживело преображај упркос сачуваној истоветности текста норме. Општа, нелична, именичка заменица није увек имала своје пуно граматичко значење. Штавише и данас, при стању судске праксе какво затичемо у овоме тренутку, значење те заменице може бити сужено легитимном радњом државе потписнице Конвенције.

Право живи у свом језичком изразу. Правна норма се, међутим, понекад не осећа сасвим лагодно у тој одећи. Њену истинску формулацију даје суд, којем се језички предлогак може каткад учинити неприкладним, али из којег ипак не може изаћи. На почетку смо казали да је право загонетка текста, коју треба одгонетнути. Додајмо да је право у ствари загонетка текста, у чијим замршеним лавиринтима обитава правда. Пресуђивање спорова је управо вештина сналажења у лавиринту. Њен највиши циљ се састоји у томе да се пронађе правда, којој теже судије и правници уопште, везани језиком као путоказом.

Језичка су значења међутим, понекад запретена. Оно што правници саопштавају сувопарним и запетљаним језиком много лепше је исказао песник. Стихови Ивана В. Лалића о загонетном, винчанском писму као да нам говоре о односу правника према тексту. Препустимо зато, на самоме крају овог написа реч песнику.

И тако читамо га свакодневно,
Ми, првог смисла потоњи читачи
И гонетамо значење му гневно,

Ми суђеници, присилни тумачи
Заданог писма које смислом прети
Из сваког слова. При том понављачи

(Иван В. Лалић, Писмо)



Годишња конференција Научног друштва Србије
ГОДКОН 2024.
31. октобар – 1. новембар 2024. Београд

DIJABETESNA NEUROPATIJA

Slobodan Apostolski

**Specijalistička ordinacija za neurologiju „APOSTOLSKI“
(Profesor neurologije Medicinskog fakulteta u penziji)**

APSTRAKT

Dijabetesna neuropatija (DN) predstavlja skup simptoma i znakova oštećenja perifernog nervnog sistema kod bolesnika sa diabetes mellitusom (DM). Ukupna prevalenca DN iznosi 30%, povećava se sa dužinom trajanja DM i 25 godina od početka DM iznosi 50%. DN se može manifestovati kao simetrična, asimetrična i kombinovana forma bolesti. Simetrične forme obuhvataju distalnu senzorimotornu predominantno senzitivnu neuropatiju, neuropatiju tankih vlakana (bolna dijabetesna neuropatija), predominantno autonomnu neuropatiju i hroničnu inflamatornu demijelinizirajuću poliradikuloneuropatiju. Asimetrične DN se odnose na akutnu proksimalnu motornu neuropatiju (diabetesni plexus-radiculitis), kranijalne mononeuropatije i periferne mononeuropatije. U 80% svih bolesnika sa DN postoji simetrična distalna senzorimotorna polineuropatija i uobičajeno je da se označava kao dijabetesna polineuropatija (DPN). Karakteriše se osećajem trnjenja, žarenja, paljenja, bockanja i mravinjanja i bolova u stopalima. Pokretljivost i snaga mišića dugo ostaje pošteđena, gase se jedino Ahilovi refleksi, ali gubitak površnog senzibiliteta i afekcija autonomnih nervnih vlakana mogu uticati na pojavu ulceracija i razvoj dijabetesnog stopala. Različiti oblici DN imaju različitu patogenezu. Metabolička patogeneza je odgovorna za nastanak DPN, neuropatije tankih vlakana i predominantno autonomne neuropatije. Hiperglikemija uzrokuje aktivaciju poliolskog puta sa nagomilavanjem sorbitola i fruktoze i indukcijom itraćelijskog osmotskog stresa, neenzimsku glikaciju proteina, aktivaciju protein kinaze C i porast aktivacije heksozaminskog puta sa manifestacijama oksidativnog stresa. Inflamatorna patogeneza je odgovorna za nastanak plexus-radiculitis, kranijalne neuropatije kao i hronične inflamatorne demijelinizirajuće poliradikuloneuropatije. S obzirom da najčešći oblik DPN počinje simptomima i znacima neuropatije tankih vlakana, neophodno je na vreme prepoznati njene simptome i znake kao što su

parestezije, dizestezije, hiperalgezija, hiperpatija i alodinija, kao i lokalne i sistemske znake autonomnih poremećaja. Stoga se dijagnoza početne DPN može i mora postaviti još u ordinaciji lekara opšte prakse. U terapijskom smislu osnov lečenja podrazumeva dobru glikoregulaciju. Lečenje razvijene forme DN je kompleksno i različito kod različitih formi DN.

UVOD

Prema Svetskoj zdravstvenoj organizaciji (WHO) globalna prevalenca diabetes mellitusa iznosi 5% (382 miliona obolelih u 2013 godini) što ukazuje na epidemiju XXI veka. Diabetes mellitus karakteriše hiperglikemija, hiperlipidemija i poremećaj metabolizma insulina. Komplikacije ove bolesti mogu biti akutne i hronične. Hronične komplikacije se manifestuju na perifernom nervnom sistemu u 60%, na bubrezima u 35% i na očima u 49% obolelih. Trijas neuropatije, nefrošpatije i retinopatije smatramo teškim komplikacijama diabetes mellitusa. Neurološke komplikacije na perifernom nervnom sistemu se ispoljavaju različitim formama neuropatija. Heterogeno spoljavanje simptoma i znakova neuropatije je posledica različitih patofizioloških mehanizama. Klinička slika služi za klasifikaciju DN kao i za prepoznavanje mehanizama nastanka postojeće komplikacije. Različitost patofizioloških mehanizama kod svake od pojedinih formi neuropatije determiniše i različitost terapijskog postupka. Sa kliničkog aspekta se sve forme dijabetesne neuropatije (DN) klasifikuju u hronične neuropatije sa simetričnim i sa asimetričnim ispoljavanjem. Nije neobično kombinovano ispoljavanje neuropatije. Najučestalija forma DN je hronična simetrična distalna sensorimotorna polineuropatija (DPN) (80%). Simetrično ispoljavanje može biti i u vidu predominantne senzitivne neuropatije, u vidu neuropatije tankih vlakana (bolna neuropatija), u vidu neuropatije debelih vlakana (ataksična neuropatija) i u vidu neuropatije sa predominantn zahvaćenim autonomnim vlaknima (autonomna neuropatija). Asimetrično ispoljavanje imaju proksimalna motorna DN (dijabetesna amiotrofija-plexus radiculitis), najčešće lumbosakralna a redje multisegmentan trunkalna, kranijalne mononeuropatije i fokalne kompresivne mononeuropatije. Akutne DN su redje i nastaju kod pogoršanja kontrole glikemije, ketoacidoze (dijabetesna neuropatska kaheksija) i kod terapijski indukovane hiperinsulinske neuropatije. Pored kliničke klasifikacije postoji i patofiziološka klasifikacija DN. Metabolička patogeneza se odnosi na hroničnu distalnu sensorimotornu predominantno senzitivnu polineuropatiju, na neuropatiju tankih vlakana, bolnu dijabetesnu neuropatiju i na autonomnu neuropatiju. Inflamatorna, imunski posredovana patogeneza je u osnovi dijabetesne amiotrofije (plexus radiculitis), kranijalne neuropatije i hronične inflamatorne demijelinizacije polineuropatije. Komplikacijama dijabetesa posredovana patogeneza je kod neuropatije u

ketoacidozi i kod kompresivnih mononeuropatija. Najredja je terapijski indukovana patogeneza kod hiperinsulinske neuropatije.

Hronična simetrična distalna senzorimotorna dijabetesna polineuropatija (DPN)

DPN je najčešća komplikacija DM. Regstruje se kod 80% svih bolesnika sa DM i komplikacijama na nervnom sistemu i najčešći je oblik neuropatije razvijenih zemalja sveta.

Uzrokuje veći broj hospitalizacija nego sve druge komplikacije dijabetesa zajedno i odgovorna je za 50-75% svih netraumatskih amputacija. Jednom nastala autonomna dijabetesna neuropatija

podize stopu mortaliteta na 25-50% unutar 5-10 godina. Postoje promenljivi i nepromenljivi faktori rizika za nastanak DPN. U promenljive faktore rizika na koje se može uticati ubrajamo lošu kontrolu glikemije, povišene masnoće u krvi, posebno hipertrigliceridemiju, povišenu albuminuriju, gojaznost, arterijsku hipertenziju i pušenje. Nepromenljivi faktori rizika su dužina trajanja DM, životna dob, visina i pol bolesnika. Loša kontrola glikemije dvostruko povećava rizik za nastanak DPN a hipertenzija povećava verovtnoću za DN za 60%. Trajanje DM duže od 10 godina povećava verovtnoću za nastanak DN za 40%, životna dob od 70 do 79 godine za 44% a kod osoba ženskog pola sa insulin zavisnim DM je veća verovatnoća za DN.

Metabolička patogeneza se zasniva na tome da hiperglikemija uzrokuje nove metaboličke puteve (poliolni put, heksozaminski put, put aktivacije protein kinaze C i put ne-enzimske glikacije proteina) koji normalno ne postoje i time se pre svega remeti osmotski balans neurona i Švanovih ćelija. U hiperglikemiji je afinitet aldozo reduktaze za glikozu povećan što dovodi do povećane produkcije sorbitola. Sorbitol ne prolazi ćelijsku membranu i akumulira se intracelularno u nervnom tkivu uzrokujući osmotski stres. Preuzimanje glikoze od strane neurona i Švanovih ćelija je nezavisno od insulina tako da u stanjima hipoinsulinemijske hiperglikemije povećanje koncentracije glikoze u ovim ćelijama, prati koncentraciju glikoze u plazmi. Osmotski stres povećava molarnost intraćelijske tečnosti i ulazak vode i dovodi do oštećenja Švanovih ćelija i degeneracije nervnih vlakana.

U DM je povećana aktivnost kompleksa NADPH oksidaze koja smanjuje produkciju glutationa, smanjuje koncentraciju azotnog oksida i povećava koncentraciju reaktivnih slobodnih radikala uzrokujući oksidativni stres. Slobodni radikali i još uvek neidentifikovani metabolički faktori aktiviraju jedarni enzim *poly(ADP-ribose) polymerase* (PARP) koji predstavlja ključni faktor za razvoj dijabetesnih komplikacija, uključujući neuropatiju. Deficit azotnog oksida i povećanje slobodnih radikala je udružen sa povećanim nivoom inflamatornih markera (IL-, TNF, CRP) koji uzrokuju mikrovaskularna oštećenja i hipoksiju.

U stanju hiperglikemije dolazi do kovalentnog vezivanja glikoze i fruktoze za proteine, nukleotide ili lipidne molekule bez aktivnosti enzima. Ovaj proces zahvata strukturne proteine nerava i krvnih sudova. Rani produkti glikacije remete ćelijske funkcije, smanjuju aksonski transport, uzrokuju stvaranje tromba, vazokonstrikciju

kao i alteracij ćelijske DNK. Rani produkti glikacije se lokalizuju u mijeliniziranim i nemijeliniziranim vlaknima, ali i u perineuriumu, endotelijalnim ćelijama i endoneuralnim mikrosudovima. Interakcija makrofaga i ranih produkta glikacije mijelina može uzrokovati segmentnu demijelinizaciju.

Osnovni mehanizmi metaboličke patogeneze DPN podrazumevaju hiperglikemijom indukovani osmotski stres, hiperglikemijom uzrokovan oksidativni stres i hiperglikemijom indukovana ne-enzimska glikacija proteina. Na nivou ćelijskih tela neurona dorzalnih ganglija, autonomnih ganglija i kičmene moždine uzrokuje poremećaje aksonskog transporta trofičkih faktora sa poremećajem funkcije i kliničkim znacima najdužih vlakana: stoga simptomi počinju na prstima stopala, sa trajanjem bolesti se penju naviše i kada dostignu nivo kolena daju simptome na prstima šaka. Metaboličku patologiju prate promene krvnih sudova. Oksidativni stres indukuje vazokonstrikciju vasa nervorum, autonomna disfunkcija indukuje arterio-venske šantove u vasa nervorum, mikroangiopatija, zadebljanje i hijalinizacija zidova i bazalnih lamina arteriola i kapilara perifernih nerava uzrokuje hipoksiju nerava, kroz izmenjene membrane kapilara u perineurium penetriraju plazma proteini uzrokujući edem i povećan intersticijalni pritisak unutar nerava, deponovanje fibrina i stvaranje tromba. Metaboličke i vaskularne promene uzrokuju primarnu aksonsku degeneraciju distalnih delova nervnih vlakana, neuropatiju dugih vlakana usled metaboličkog oštećenja anterogradnog aksonskog transporta i sekundarnu segmentnu demijelinizaciju.

KLINIČKA SLIKA DPN

U svakodnevnom radu neurolog otkriva znake DPN u različitim stadijumima razvoja kliničke slike. U razvoju DN u bolesnika koji nije lečen klinički znaci se postepeno komplikuju. U ranom stadijumu DPN pacijent ima osećaj hladnoće i trnjenja stopala promenljive jačine do nemogućnosti nalaženja položaja nogu ispod pokrivača. Tegobe se nekad smenjuju sa osećjem pečenja, žarenja stopala. Ovaj početni stadijum DPN je uzrokovan oštećenjem tankih vlakana (A α i C) koja prenose bolne i temperaturene drži. Simptomi trnjenja i osećaja hladnoće odgovaraju početnom stadijumu DPN sa aksonalnim oštećenjem senzitivnih i autonomnih tankih vlakana. Lokalna kožna temperatura stopala bude smanjena, a kao posledica oštećenja autonomnih vlakana koža postaje suva, manjena je funkcija znojnih žlezda i nastaje distalni gubitak maljavosti. Sa trajanjem bolesti prelazi u teži oblik bolne i autonomne neuropatije tankih vlakana sa svim karakteristikama neuropatskog bola koji bitno narušava kvalitet života i često uzrokuje depresivno raspoloženje. Ova početni stadijum DPN se karakteriše neprijatnim nadražajnim simptomima. Kada aksonska degeneracija najdužih vlakana dovede do gubitka funkcije senzitivnih vlakana, nastaje gubitak osetljivosti za površne draži po tipu hipestezije i hipalgeziji u distribuciji kratkih čarapa, soknica. Bolesnik ne oseća dodir obuće, često ne oseti

gubitak papuče dok hoda po kući, i dešava se da ne registruje bolne i temperaturne draži i da naknadno otkriva povrede i opekotine stopala. Dalji stepen progresije DPN se manifestuje slabošću mišića stopala, zapinjanjem prstiju o najmanju neravninu na podu, otežanim stajanjem na petama i pregledom se pored distalnog oštećenja senzibiliteta po tipu čarapa registruju ugašeni Ahilovi refleksi. Ovi klinički znaci ukazuju da je primarna aksonska degeneracija komplikovana sekundarnim demijelinizacijama perifernih nerava. U tom stadijumu mogu napredovati trofičke promene kože na prstima stopala sa rizikom za neuropatski ulkus stopala. Pored kliničkih znakova, najbolja dijagnostička metoda za DPN je elektromioneurografski (EMNG) pregled koji otkriva DPN tek u trećem i četvrtom stadijumu bolesti. U prve dva stadijuma neuropatskog bola sa oštećenjem tankih vlakana konvencionalni EMNG nije od velike koristi. Kasni, najteži stadijum DPN karakteriše i zahvaćenosti i debelih vlakana sa teškim oštećenjem ne samo površnog već i dubokog senzibiliteta, sa generalizovanom arefleksijom i senzornom ataksijom i sa uznapredovalim neuropatskim ulkusima stopala. U tom stadijumu su pored znakova neuropatije ispoljeni i teški znaci angiopatije sa slikom dijabetičnog stopala.

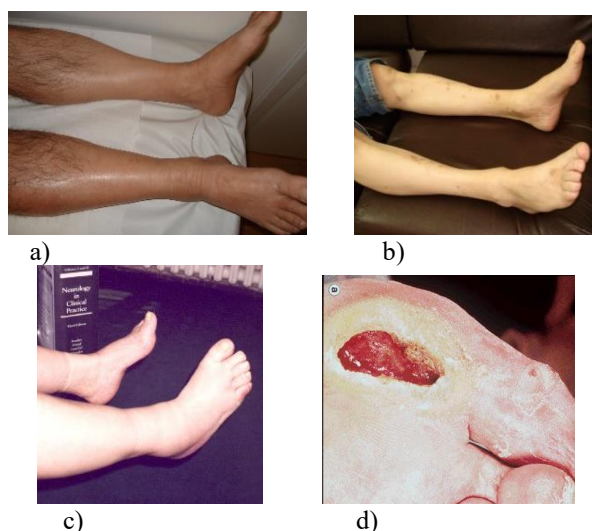
Gubitak osetljivosti za bol uz teške autonomne poremećaje a uz očuvanu mišićnu snagu uzrokuje nastanak bezbolnih povreda – „pseudosiringomijelična neuropatija”, idiopatskih bula, ulceracija tabana, najčešće u nivou vrhova metatarzalnih kostiju, sa znacima neuropatske osteoartropatije (Charcot) najčešće tarzalnih i tarzometatarzalnih zglobova.

Znaci autonomne neuropatije su mioza i oslabljena reakcija zenica na svetlost, snižen kardiovaskularni refleks, denervacija vagusa (tahikardija u miru), posturalna hipotenzija, bezbolni infarkti srca, gubitak erekcije sa očuvanom ejakulacijom i orgazmom, retrogradna ejakulacija, atonija bešike, konstipacija, noćni prolivi, incontinentio alvi, gastropareza, anhidroza stopala i intolerancija toplote sa profuznim znojenjem glave i trupa.

DIJAGNOZA DPN

Dijagnoza početne faze DPN, dijabetične neuropatije tankih vlakana se zasniva na postojećoj dijagnozi diabetes mellitusa i na dijagnozi neuropatskog bola zasnovanoj na anamnestičkim podacima o vremenskoj i prostornoj distribuciji parestezija, hiperestezija, dizestezija, hiperalgezija, hiperpatije, alodinije i bolova. Autonomni znaci na koži stopala i distalni gubitak maljavosti dopunjuje dijagnozu neuropatije tankih vlakana. Sa razvojem bolesti se neurološkim pregledom registruje distalni gubitak površnog a zatim i dubokog senzibilitet, gubitak Ahilovih refleksa i zatim slabost distalnih mišića sa nemogućim stajanjem na petama i sa nestabilnim hodom. Tek u tom stadijumu konvencionalna elektromioneurografija dobija dijagnostički značaj i tada se registruju pad amplitude senzitivnih akcionih

potencijala, usporenje brzina provođenja senzitivnih nerava (suralis), produženje latence F talasa, neuropatski potencijali mišićnih vlakana, pad amplitude zbirnih akcionih potencijala mišića i usporenje motornih brzina provođenja.



Slika 1. Klinički znaci progresije DPN: autonomna (a), bolna senzitivna (b), pseudotabesna neuropatija (c) i dijabetesno stopalo (d)

LEČENJE DPN

Etiološkim lečenjem smatramo dobru glikoregulaciju i farmakoterapiju metaboličkih poremećaja a simptomatskim lečenjem otklanjamo neuropatski bol i vršimo prevenciju ulkusa. Značaj dobre glikoregulacije je pokazan u rezultatima studije kojom je dokazano smanjenje prevalence kliničkih i elektrofizioloških znakova DPN za 50% kod bolesnika lečenih intenzivnom insulinskom terapijom tokom pet godina praćenja (DCCT research hropu 1993). Od mnogobrojnih farmakoterapijskih pokušaja lečenja metaboličkog poremećaja u kliničkoj praksi se primenjuje benfotiamine koji smanjuje stvaranje ranih produkta glikacije i deluju antioksidativno i α -lipoininska kiselina koja ima jaki antioksidativni, antiinflamatorni, neuroprotektivni i antinoiceptivni efekat. Za simptomatsko lečenje neuropatskog bola dijabetesne neuropatije tankih vlakana se koristi amitriptilin, gabapentin, pregabalin, duloxetine, venlafaksin, a redje opioidni analgetici. Lečenje autonomnih poremećaja podrazumeva lečenje ortostatske hipotenzije (elastične čarape; 9-alfa-fluorohydrocortison; midodrin-alfa-1-adrenergički agonist; yohimbin-alfa-2-adrenergički antagonist), lečenje enteropatije (dijeta, metoclopramide; cisprid;

bethanechol; pyridostigmin; jejunostoma), cistopatija (manuelni manevar za pražnjenje bešike; bethanechol; alfa-1-blokator doxazosin) i lečenje seksualne disfunkcije (cialis; intrapenilne injekcije regitina ili papaverina).

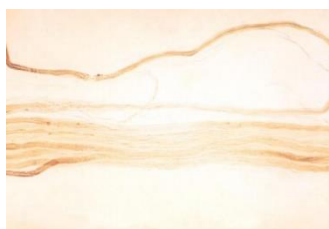
SIMETRIČNA DISTALNA I PROKSIMALNA SENZORIMOTORNA NEUROPATIJA DEBELIH VLAKANA

Subakutni razvoj slabosti distalnih i proksimalnih mišića sa parezama i paralizama uz oštećenje dubokog senzibiliteta ukazuje na inflamatornu, autoimunsku poliradikuloneuropatiju sa simetričnom zahvaćenošću krakih i dugih vlakana. Najčešće se ispoljava kod bolesnika koji već imaju razne stepene izraženosti

distalne simetrične aksonalne neuropatije. Uvek kada kod bolesnika sa hroničnim simptomima distalne predominantno senzorne aksonalne neuropatije nastanu jake mišićne slabosti atrofije mišića treba dopunskim ispitivanjem verifikovati hroničnu autoimunsku demijelinizacionu neuropatiju. Hronična inflamatorna demijelinizaciona polineuropatija je učestalija u bolesnika sa diabetes mellitusom u odnosu na zdravu populaciju. Slabost proksimalnih i distalnih mišića nije praćen bitnim atrofijama mišića. Nalazi se globalna arefleksija i oštećenje i dubokog senzibiliteta, usporenje brzina i blokovi provođenja perifernih nerava kao i albuminocitološka disocijacija u cerebrospinalnoj tečnosti. Ovde je indikovano imunosupresivno lečenje dužom primenom kortikosteroida a u rezistentnih formi bolesti primenom intravenskih imunoglobulina.



a)

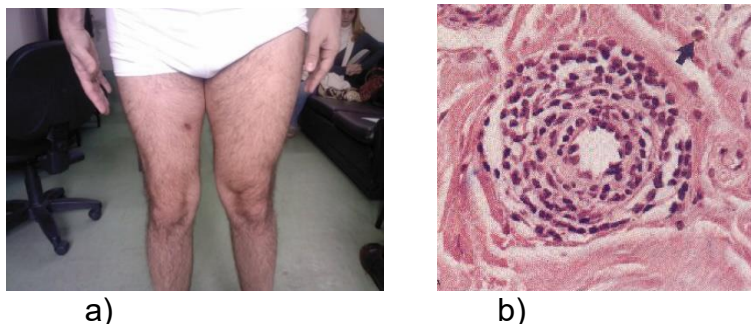


b)

Slika 2. Simetrične paralize kod inflamatorne demijelinizacione neuropatije (a), demijelinizacija debelih vlakana (b)

ASIMETRIČNA DIJABETESNA NEUROPATIJA - AKUTNA PROKSIMALNA MOTORNA NEUROPATIJA (DIJABETESNA AMIOTROFIJA - PLEXUS RADICULITIS)

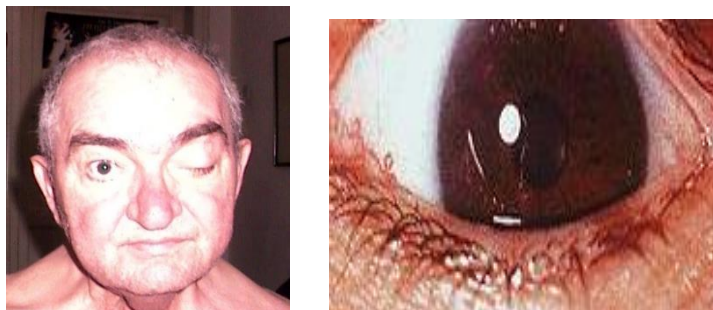
Ovo je inflamatorni oblik dijabetesne neuropatije koji se karakteriše akutnim početkom jakih bolova u prednjoj strani jedna nadkolenice sa brzom atrofijom i paralizom mišića iliopsoasa, quadriceps femorisa, adductor magnus i obturatoriusa, ugašenim patelarnim refleksom i nemogućnošću hoda. Bolest je uzrokovana jednostranim vasculitisom lumbosakralnih korenova kičmene moždine a retko se manifestuje obostrano. Brzi terapijski efekat sa otklanjanjem bola i postepenim oporvkom funkcije mišića se postiže visokim dozama kortikosteroida u vidu pulsni infuzija da bi se posle nastavilo peroralno lečenje sa opadajućim dozama prednizon.



Slika 3. Asimetrična proksimalna atrofija mišića (a), vasculitis perifernog nerva (b)

ASIMETRIČNE DIJABETESNE NEUROPATIJE – KRANIJALNE MONONEUROPATIJE

Inflamatorna neuropatija koja zahvata pojdeine kranijalne nerve, obično kod starijih osoba sa dijabetesom. Najčešće zahvata treći kranijalni nerv, okulomotorius, počinje bolom u oku a zatim paralizom svih ekstraokularnih mišića inervisanih okulomotoriusom, sa ptozom i strabizmom ali sa poštedom parasimpatičkih vlakana i bez dilatacije zenice. U osnovi obe neuropatije je takodje vasculitis, reaguje vrlo povoljno na visoke doze kortikosteroida ali je i kod nelečenih bolesnika zapažen oporavak posle 6-8 nedelja. Redje se ova bolest manifestuje na VI i VII kranijalnom nervu.



Slika 4. Dijabetesna paraliza okulomotoriusa

ASIMETRIČNE DIJABETESNE NEUROPATIJE – PERIFERNE MONONEUROPATIJE

Metabolički poremećaj anterogradnog aksonskog transporta trofičkih faktora i endoneuralna mikroangiopatija povećava sklonost ka kompresivnim neuropatijama perifernih nerava kod dijabetesa. Oštećenje pojedinih perifernih nervsa sa oštećenjem senzibiliteta i gubitkom mišićne snage počinje polako i progresivno se razvija. Najčešće zahvaćeni nervi su medianus, ulnaris, cutaneus femoris lateralis i tibialis. U trećine bolesnika sa dijabetesom se otkrivaju kompresivna neuropatija medianusa, sindrom karpalnog tunela. Fizijatrijske metode lečenja i hirurška dekompresija su neophodni.



a)

b)

c)

Slika 5. Dijabetesna neuropatija medianusa (a), ulnarisa (b) i radialisa (c)

ZAKLJUČAK

Simetrična distalna aksonalna senzorimotorna dijabetesna neuropatija sa najčešće nalazi kao izolovani entitet, dok se svi ostali oblici dijabetesne neuropatije nalaze u kombinaciji sa prethodnom ili u kombinaciji sa više oblika drugih

dijabetesnih neuropatija. Kod većine bolesnika je neophodno kombinovati više terapijskih postupaka.

Reference

1. Djordjevic, G., Djuric, S., Djordjevic, V., Apostolski, S., Zivkovic, M. The role of oxidative stress in pathogenesis of diabetic neuropathy: Erythrocyte superoxide dismutase, catalase and glutathione peroxidase level in relation to peripheral nerve conduction in diabetic neuropathy. In: Role of the Adipocyte in development of Type 2 Diabetes. Coleen Croniger, 2011, pp153-170.
2. Apostolski, S. Dijabetesna bolna neuropatija. U: Hronični bol- mehanizmi, dijagnostika, lečenje (Ed. M. Pjević), Medicinski fakultet, Univerzitet u Novom sadu, Novi Sad, 2017, pp 158-161.
3. Ziegler, D., Tesfaye, S., Spallone, V., Gurieva, I., Al Kaabi, J., Mankovsky, B., Martinka, E., Radulian, G., Nguyen, K.T., Stirban, A.O., Tankova, T., Varkonyi, T., Freeman, R., Kempler, P., Boulton, A.JM. Screening, diagnosis and management of diabetic sensorimotor polyneuropathy in clinical practice: International expert consensus recommendations. Diabetes research and clinical practice, 186 (2022), 109063.
4. Tesfaye, S., Boulton, A.J.M., Dickenson, A.H. Mechanism and management of diabetic painful distal symmetrical polyneuropathy. Diabetes Care, 36 (2013), pp 2456-2465.
5. Ziegler, D., Nowak, H., Kempler, P., Vargha, P., Low, P.A. Treatment of symptomatic diabetic polyneuropathy with the antioxidant alpha-lipoic acid : a meta-analysis. Diabet Med, 21 (2004), pp114-121.
6. Bansal, V., Kalita, J., Misra, U.K. Diabetic neuropathy. Postgrad Med J, 82 (2006), pp 95-100.
7. Zychowska, M., Rojewska, E., Przewlocka, B., Mika, J. Mechanisms and pharmacology of diabetic neuropathy – experimental and clinical studies. Pharmacol Rep, 65 (2013), pp 1601-1610.
8. Bril, V., England, J., Franklin, G.M., Backonja, M., Cohen, J., Del Toro, D., Feldman, E., Iverson, D.J., Pekins, B., Russell, J.W., Zochodne, D. Evidence-based guideline: Treatment of painful diabetic neuropathy. Neurology, 78 (2011), pp1758-1765.
9. Bird, S.J., Brown, M.J. Diabetic neuropathies, in: Neuromuscular Disorders in Clinical Practice (Eds. B. Katirji, H.J. Kaminski, D.C. Preston, R.L. Ruff, B.E. Shapiro), Butterworth-Heinemann, Boston, 2002, pp. 598-621.



Годишња конференција Научног друштва Србије
ГОДКОН 2024.
31. октобар – 1. новембар 2024. Београд

Хигс бозон: неопходност његовог постојања и откриће

Петар Ацић

**Физички факултет Универзитета у Београду
Студентски трг 12, 11000 Београд**

АПСТРАКТ

Владајућа теорија у свету елементарних честица Стандардни модел (СМ), беспрекорно је предвидела преко 300 честица у природи, а њихово постојање је експериментално потврђено. До 2012. године у тој успостављеној хијерархији отривених честица недостајао једино Хигс бозон чије се предвђање везује за шездесете године 20. века кад је и установљен СМ од стране познатих физичара, добитника Нобелове награде: Стивена Вајнберга, Абдуса Салама и Шелдона Глешоуа. Неизоставна претпоставка о постајању Хигс-овог поља и одговарајућег медијатора, Хигс бозона, коју је изнело неколико бриљантних физичара, касније и Нобеловаца: Питер Хигс, Франсоа Англер и Роберт Броут, представљало је неку врсту спаса за Стандардни модел, најпрецизнију теорију у физици, посебно за онај њен сегмент којим се изузетно сложеним математичким апаратом објашњава порекло масе честицама. И после дефинитивног открића Хигс бозона, то значи и потврде постојања Хигс-овог поља, деловање Хигсовог механизма у додели масе честицама и његова динамика дејства остају и даље мистерија, тако да представљају приоритет у изучавању у оквиру Хигсовог сектора. Више детаља о математичком апарату СМ биће речи у предвиђеном излагању на Конференцији.

УВОД

Основно оруђе физичарима у истраживањима у физици честица, или у физици високих енергија, су акцелератори који представљају сложене уређаје за убрзавање наелектрисаних честица и јона и врло комплексни вишеслојни детектори огромних димензија. У 20. веку физика честица је учинила огроман напредак, и у садашњем 21. веку тај тренд се наставља. Изградње нових

грандиозних акцелераторских постројења углавном су мотивисане значајним новим открићима, изучавањем још необјашњених, као и проверама још непотврђених феномена у физици високих енергија. У Европској организацији за нуклеарна истраживања CERN, познатој и под именом Европска лабораторија за физику честица, наомак Женева, 2010. године пуштен је у рад Велики хадронски сударац - LHC (Large Hadron Collider), до сада највеће акцелераторско постројење за истраживања у физици високих енергија. Ова инсталација има за основни циљ да понуди истраживачке програме највишег нивоа свим физичарима честица у свету. У градњи овог грандиозног комплекса учествовали су најбољи стручњаци, специјалисти и истраживачи из великог броја држава у свету, а готово из свих европских држава међу којима је и наша. У припремању експеримената, њиховом извођењу, као и у анализи касније добијених експерименталних података, ангажован је такође велики број истраживачких тимова из целог света, међу којима се налазе групе српских научника: физичари честица са Физичког факултета Универзитета у Београду, Института за физику у Земуну и из Института за нуклеарне науке "Винча".

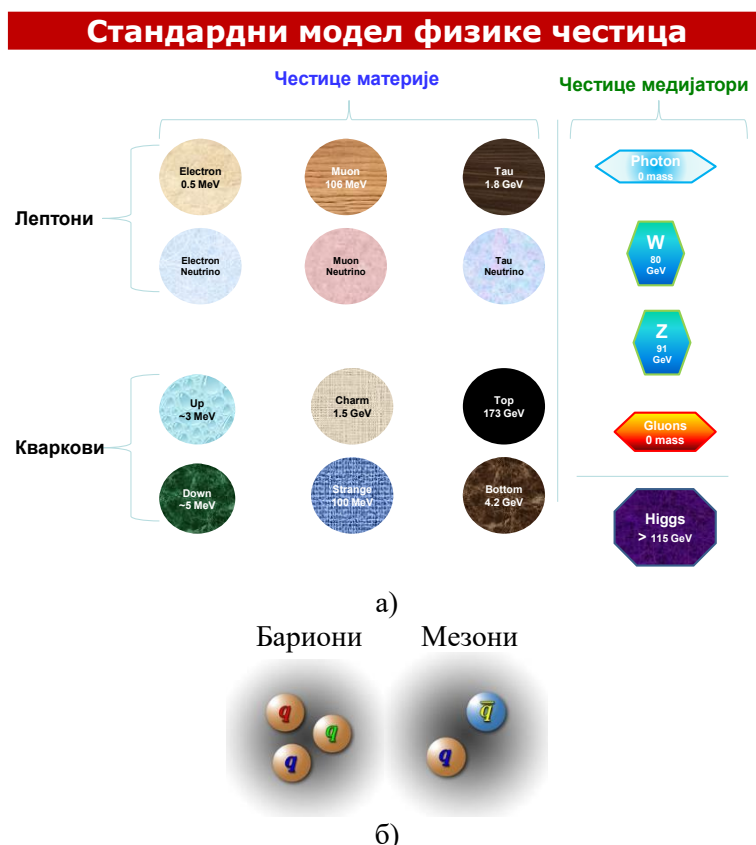
Стандардни модел – основна теорија физике честица

Према СМ, најпрецизнијој теорији у физици данас, целокупна материја у универзуму изграђена је: од дванаест елементарних фермиона (елементарних честица материје са половицим спином), дванаест њихових античестица, као и укупно дванаест калибрационих бозона (честица са спином нула или један). Основни циљ Физике честица је изучавање најелементарнијих делова материја, као и интеракција (сила) које на њих делују и одређују њихово понашање. У природи постоје четири силе: електромагнетска, јака нуклеарна и слаба сила. Гравитациона сила добија на значају у интеракцијама масивних објеката и на постојећим енергијама није укључена у Стандардни модел.

Дејство силе у квантној физици се разликује од класичног прилаза и подразумева постојање одговарајућег физичког поља. Два објекта или две честице трпе дејство или интеракцију посредством размене основног кванта или медијатора поља на исти начин као што електромагнетска сила делује на два наелектрисања разменом фотона који представља квант електромагнетског поља, преносиоца електромагнетске силе.

Кад кажемо елементарне честице, онда сматрамо да оне немају структуру, а учествују у грађењу осталих сложених честица. Четири калибрациона бозона у последњој колони табеле на слици 1, представљају медијаторе три основне интеракције (силе) у природи: електромагнетске (фотон), слабе (W и Z^0) и јаке интеракције (глуони). Треба имати у виду да се медијатор слабе интеракције W јавља у две форме наелектрисања (W^- , W^+), док се медијатори јаке интеракције, глуони јављају укупно у осам модификација. Овом скупу

фундаменталних честица у табели 2012. године придружио се Хигс бозон, последња честица која је недостајала, а чије постојање је предвидео Стандардни модел.



Слика 1. а) Фундаменталне честице; б) Две групе хадрона: бариони и мезони.

Главна својста сваке честице су: маса, спин, наелектрисање, парност. Треба нагласити такође да свака честица има своју античестицу која се од ње разликује, на пример, по супротном наелектрисању. Честице са половицим спином називамо фермионима, а оне са спином 0 или целим бројем, бозонима. Дванаест елементарних честица материје, фермиона подељено је у две групе (Сл. 1а): на лептоне, најлакше честице и на кваркове који граде теже честице, а које такође третирамо као елементарне честице. За разлику од лептона који подлежу електромагнетским и slabим интеракцијама, другу важну групу чине хадрони који су сложене честице и покоравају се јакој, али и електромагнетској

интеракцији ако носе наелектрисање. Хадрони се деле у две групе: на барионе (припадају фермионима) који су састављени од три кварка (кваркова и антикваркова) и мезоне (бозони) који се састоје од два кварка (комбинација кварк-антикварк, Сл. 16). Лептонима и кварковима додајемо још дванаест калибрационих бозона, који су преносиоци три фундаменталне интеракције: фотон (γ), Z^0, W^+, W^- и 8 глуона. Преносилац гравитације, као четврте фундаменталне интеракције, је гравитон чије регистровање још није потврђено.

Порекло масе

Експерименти на ЛНС-у би требало да омогуће физичарима да комплетирају бар један део великог пута који је још давно у 17. и 18. веку започео Исак Њутн теоријом гравитације, а онда у првим деценијама 20. века наставио Ајнштајн својом бриљантном Специјалном и Општом теоријом релативности. Знамо да је у основи гравитационе силе маса, али до данас ни једна од ове две моћне теорије није успела да објасни појам и порекло масе, као и зашто неке честице имају масу, а неке немају.

Велики хадронски сударач и експерименти на њему дизајнирани су управо да покушају да дају одговор на ово и многа друга приоритетна питања у физици високих енергија. Истовремено, ови експерименти би могли да омогуће боље разумевање још неких феномена који већ дуго времена представљају непознаницу у физици. Међу таквим феноменима вероватно је најкомплекснији онај који се односи на мистерију недостајуће масе у природи и питање постојања тзв. “тамне материје” и “тамне енергије”. Данас се претпоставља да материја коју опажамо представља само 4 или 5 % од укупне материје која би морала да постоји у космосу. Такође се очекује да експерименти омогуће детаљније изучавање разлога због којих ми данас опажамо само материју, а не и антиматерију, иако се верује да је број честица (атома елемената) и број одговарајућих античестица на самом настанку космоса пре 13.7 милијарди година био једнак. Све су ово разлози због којих ЛНС може још увек да одигра историјску мисију, да наша сазнања доведе на нови, виши ниво разумевања универзума.



Слика 2. Авионски снимак LHC комплекса са означена четири експеримента.

Акцелераторски комплекс LHC

Велики хадронски сударач LHC чини прстен од две акцелераторске цеви у којима се убрзавају снопови протона (као и тешких јона), у супротним смеровима. Иначе, цео комплекс се простира на простору који обухвата територију на граници Швајцарске и Француске у предграђу Женеве (Слика 2). Акцелераторски прстен је смештен у тунелу обима 27 km који се налази испод земље на просечној дубини од 100 метара. Оба снопа протона се независно и истовремено убрзавају до енергија од 7 TeV, а затим се доводе у стање судара на четири места при укупној енергији у систему центра масе од 14 TeV (14 хиљада милијарди електрон волти). Судари се дешавају у самом центру детектора. На LHC-у постоје четири детектора: ALICE, ATLAS, CMS и LHCb (Сл. 2). У наредним годинама, радиће се нова реконструкција LHC комплекса и сва четири детектора, а експлоатација после реконструкције LH-LHC (High Luminosity LHC) се очекује до 2032. године или још касније.

Основне компоненте LHC-а представљају суперпроводни диполни магнети у чијем средишту су смештене две акцелераторске цеви. У току процеса убрзавања електричним пољем високе фреквенције, протони су подвргнути дејству снажног магнетског поља суперпроводних диполних и квадруполних магнета врхунске технологије кроз које тече струја до 12000 A. Кроз магнете струји течни хелијум на температури од 2K или -271C чиме се одржава суперпроводно стање магнетских намотаја. Пре него се доведу у стање судара, протони при убрзавању обиђу овај прстен преко 11000 пута и превале пут два пута дужи од растојања између Земље и Сунца. У припреми и извођењу експеримената, ангажован је велики број научника и специјалиста различитог

профила из свих крајева света, укључујући и Србију. Само на два таква експериментална места: ATLAS и CMS, која носе имена сложених детектора, величине петоспратних зграда, ангажовано је више од 9000 људи.

Настојање за познавањем стања материје непосредно после Велике експлозије када су, верује се, све силе биле уједињене, можемо да назовемо пут у срце материје. Са укупном тренутном енергијом од 14 TeV, LHC нас води до структуре материје димензија 10^{-18} m што одговара временском тренутку од 10^{-12} (хиљадитом делу милијардитог) дела секунде од Велике експлозије када су интеракције доминирале између лептона и кваркова и када је температура била 10^{16} степени.

Шта је Хигс бозон и зашто је његово откриће значајно?

Стандардни модел успешно описује све елементарне честице, као и интеракције између њих. Централно место у овој теорији заузима питање уједињења електромагнетске и слабе интеракције и питање порекла масе: зашто честице уопште поседују масу? А без масе, природа којом смо окружени, као и цео универзум, изгледали би потпуно другачије. На пример, кад електрони не би имали масу, кретали би се брзином светлости, не би постојали ни атоми, а онда ни материја, као ни целокупни живи свет. Сунце које сија захваљујући енергији из нуклеарних реакција у којима се непрекидно одвија међусобно претварање масе у енергију и обрнуто, такође не би постојало. Многе науке као што су физика, хемија, биологија не би имале смисла.

Према СМ постојање сила (интеракција) везује се за присуство физичког поља. Дејство сила уствари представља пренос, односно размену кванта-медијатора одговарајућег поља. Показује се да ове честице, медијатори припадају класи бозона (спин=0,1,2), а два објекта осећају дејство силе тако што наизменично размењују бозон одговарајућег поља. Дакле, силе у природи делују тако што размењују кванте физичког поља које карактерише дату интеракцију. Ако бозон поља поседује мању масу, дејство силе ће имати већи домет, а ако бозон има масу нула, теоретски следи да ће та интеракција имати бесконачан домет. Ово је управо случај код електромагнетске интеракције (или Кулонове силе) где фотон представља основни квант-бозон електромагнетског поља (маса фотона је нула), па се зато сматра да је домет дејства електромагнетске силе бесконачан. Обрнут случај имамо код слабе интеракције. Три бозона-медијатора ове силе: W^- , W^+ и Z^0 , имају велику масу у поређењу са осталим фундаменталним честицама и зато је домет дејства слабе интеракције врло кратак и временски много “спорији” у односу на остале интеракције. Према СМ, из математичке формулације произилази да све честице, као и фундаментални бозони имају масу нула, али се у тој математичкој

формулацији појављује и један бозон који поседује масу. Претпоставка је да тај бозон, коме је дато име Хигс бозон (према физичару Питеру Хигсу који га је међу првима предвидео), представља управо разлог нарушења те симетрије међу масама честица. Полазна претпоставка је да смо свуда у природи окружени једним комплексним, скаларним (Хигсовим) пољем које нама непознатим начином "додељује" честицама масу. Врло компликована математичка формулација овог поља унутар СМ је успешно комплетирана (последњих 30 година, пет или шест Нобелових награда из физике), али не разумемо његово физичко деловање, посебно динамику његовог механизма. Ако такво поље постоји, први истраживачки корак би био да се региструје његов основни квант, Хигс бозон за који се верује да би могао да буде кључ у разумевању механизма креирања маса како елементарним честицама, тако и целокупној материји у природи. Регистровањем Хигс бозона 2012. године у експериментима CMS и ATLAS потврђено је постојање Хигс поља, као и валидност целе ове сложене теорије. Међутим, предстоји нам и даље врло дуг пут до потпуног разумевања динамике дејства Хигс механизма, као и до разрешења мистерије зашто неким честицама он додељује масу, а неким не. Можда ће се даље створити услови и за боље разумевање порекла асиметричне дистрибуције масе у универзуму, за одсуство антиматерије, као и за евентуално разумевање разлога због којих је видљиво само 5% материје у природи. Покушај разумевања и евентуалних одговора на нека од ових питања, управо су разлог постојања експеримената који се одвијају на Великом хадронском сударачу LHC у CERN-у.

Детектор CMS

Детектори CMS и ATLAS на LHC-у на којима се обављају слични експерименти, представљају најкомплексније и најпрецизније истраживачке инструменте који су икада направљени. На пример, детектор CMS [1,2] се састоји од приближно 100 милиона појединачних детекторских елемената укомпованих у четири концентрична детекторска слоја цилиндричних форми у централном делу: Детектор трагова (TRACKER), калориметри: ECAL и HCAL и Мионске коморе. Између ECAL и HCAL налази се највећи до сада конструисани суперпроводни соленоид. Иста детекторска структура [2], али у форми дискова, заступљена је код предњег и задњег затварачког дела детектора. Сваки од детекторских слојева је дизајниран и конструисан тако да региструје одређену врсту честица, да изврши специфичан задатак, да региструје нове честице и физичке феномене при брзини њиховог дешавања од 40 милиона пута у секунди. Комбиновањем информација из главна четири детекторска слоја [1], омогућена је идентификација и прецизно мерење енергија и импулса свих честица произведених у месту судара два снопа

протона. Судари протона се дешавају у центру детектора, а цео експериментални комплекс CMS се налази на просечној дубини од 100 m испод површине земље. Експерименти се обављају од тренутка од када је LHC започео са радом, тј. од тренутка када су остварени први судари протона крајем марта 2010. године. У међувремену су била два прекида ради сервиса и реконструкције акцелераторског комплекса LHC и свих детектора.

Нове откривене честице су углавном нестабилне и оне се у врло кратком временском интервалу распадају у каскаду лакших, стабилнијих и већ познатих честица. При проласку кроз детектор CMS, честице остављају карактеристичне трагове или "записе" у различитим слојевима што омогућава њихову идентификацију. На овај начин, присуство или одсуство евентуално неких нових честица може врло лако да се констатује. Да би се повећала вероватноћа продукције ретких честица, као што је на пример Хигс бозон, групе (банчеви) убрзаних протона у LHC-у сударају се 40 милиона пута у секунди. Трагови, као и догађаји услед проласка честица анализирају се ултра брзом електроником, а бележе се само догађаји учестаности 100 догађаја у секунди који су од интереса, а према већ утврђеним каналима распада Хигс бозона. Процењује је да на сваку милијарду догађаја требало би да дође један који одовара Хигс бозону, приближно један у току дана. Значи, неопходан је висок интензитет снопова протона, високе енергије, , врло осетљив детекторски систем и коначно врло осетљива и ефикасна метода анализе добијених експерименталних података.

Регистровање Хигс бозона

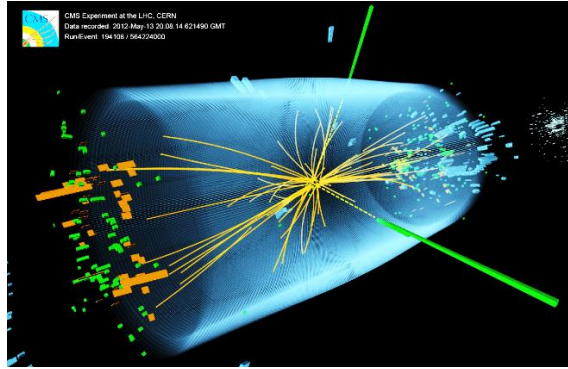
Огромни и сложени детектори који се користе у оваквим експериментима по правилу имају форму цилиндра [1,2]. Детектор је дизајниран тако да регистрацијом и идентификацијом познатих честица креираних у сударима, на пример: миона, електрона и фотона, као и евентуално нових честица, омогући прецизно мерење њихових енергија, порекла и позиције њиховог настанка у детектору. Утврђивањем порекла познатих честица и мерењем њихових карактеристика, утврђујемо постојање евентуално нових феномена и честица. Кад се Хигс бозон формира у сударима протона, због врло кратког живота, не може да се региструје директно, већ посредством продуката свог распада. Хигс бозон се према SM распада посредством неколико канала распада на лакше и познате честице које можемо да детектујемо. У анализи експерименталних података и реконструкцији регистрованих догађаја, користе се сви канали за које се претпоставља да би могли да садрже честице настале распадом Хигс бозона, а то су честице чију природу и својства добро познајемо. Дакле, присуство нових честица које се тренутно утврђујемо на основу честица из њиховог распада. Честице често поседују неколико канала распада, па се

изучава сваки канал распада посебно, а онда се ти резултати комбинују. За регистровање Хигс Бозона биле су неопходне сложене и детаљне анализе експерименталних података и оне су спроведене на укупно пет канала распада који одговарају распаду Хигс бозона према предвиђањима СМ.

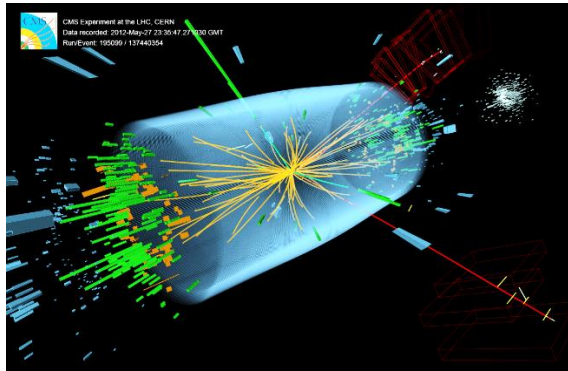
Код четири канала је регистрован конзистентан вишак догађаја на масеној скали око 125 GeV (Сл. 4а и 4б). Два канала распада Хигс бозона са највећом осетљивошћу су: распад на два фотона ($H \rightarrow \gamma\gamma$) и распад на два Z бозона (ZZ) који у коначном стању дају четири лептона ($H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$). Овде лептони могу да буду електрони, миони или помешани електрони и миони (Сл. 3б). Електрони и миони су честице сличних својстава. Миони су нестабилне честице и око 207 пута су веће масе од електрона.

Комбинацијом догађаја из ова два канала распада добијена је маса регистроване честице са статистичким значајем од "5-сигма" и она је износила: $(125.6 \pm 0.5) \text{ GeV}$ [3]. За параметар сигма (σ) приближно узимамо ширину сигнала који представља регистроване догађаје, на његовој половини висине, па тако интензитет (висину) регистрованог сигнала од "3-сигма" третирамо као индикацију или обсервацију догађаја, док се открићем сматра сигнал чији интензитет (односно, статистички значај) има минималну вредност од "5-сигма".

Два поменута канала распада Хигс бозона: 1) $H \rightarrow \gamma\gamma$ и 2) $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$ су била специјално важна, јер омогућавају мерење масе нове регистроване честице са високом прецизношћу. На пример, у каналу $\gamma\gamma$ маса се одређује на основу енергије и праваца два фотона високе енергије (Сл. 3а) у кристалном електромагнетском калориметру ECAL детектора CMS [1]. У каналу ZZ , маса се одређује на основу распада два Z бозона при чему се сваки распада на пар супротно наелектрисаних електрона ($Z \rightarrow e^- e^+$) или на пар супротно наелектрисаних миона ($Z \rightarrow \mu^- \mu^+$) тако да у излазном каналу могу да постоје четири електрона, четири миона или пар електрона и пар миона. На Сл. 3б приказан је случај регистровања распада пара електрона и пара миона. Директна мерења ових наелектрисаних честица се одвијају комплементарно у три детекторска слоја детектора CMS: унутрашњи детектор трагова (Inner tracker), ECAL и детектор миона (muon chambers) [1,2]. На крају, треба истаћи да је регистровање Хигс бозона још један триумф теорије СМ, али и да предстоје даља изучавања ове честице, првенствено у интеракцијама са осталим честицама како би се више светла бацило на разумевање механизма додељивања масе честицама.

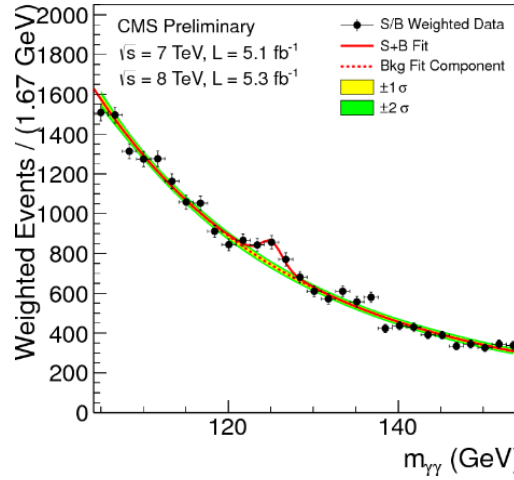


a) $H \rightarrow \gamma\gamma$

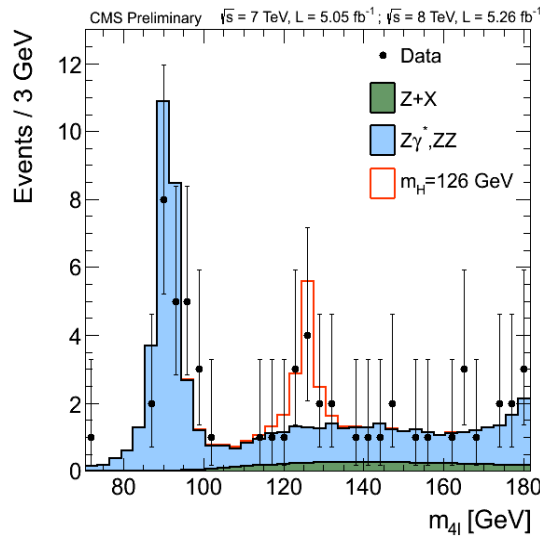


б) $H \rightarrow ZZ \rightarrow e^-e^+ \mu^-\mu^+$

Слика 3. Догађаји забележени 2012. године детектором CMS при судару протона на укупној енергији од 8 TeV. Приказани су а) распад Higgs бозона на пар фотона (испрекидани жути трагови који се завршавају пуним зеленим линијама) и б) на пар Z бозона од којих се један распада на пар електрона (две зелене линије), а други на пар миона (две црвене линије).



Слика 4. а) Дистрибуција реконструисане масе канала распада: $H \rightarrow \gamma\gamma$ са подацима добијеним детектором CMS у 2011. и 2012. години (црне тачке). Вишак догађаја означен црвеном линијом представља Хигс бозон.



Слика 4. б) Дистрибуција реконструисане масе канала распада из масе 4 лептона: $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$ ($4e$, 4μ и $2e2\mu$). Црне тачке представљају експерименталне податке, а црвена линија сигнал Хигс бозона.

Међутим, Велики хадронски сударац LHC и експерименти који се на њему одвијају, као што је већ наглашено, имају много шири истраживачки програм.

Сам LHC је пројектован као машина за открића и практично у свим експериментима се очекују или нека нова открића или разјашњења феномена која би требало да нам бар разјасне како природа функционише у појединим фазама. Поред одговора на питање о пореклу масе и о механизму додељивања масе честицама, очекујемо да нешто више сазнамо о узроку асиметрије материје и антиматерије, тј. због чега смо ми окружени само материјом, а знамо да су исте количине материје и антиматерије створене при самом настанку универзума, зашто видимо само 5% материје и где се налази остатак од чак 95% материје у универзуму и каквог је састава, зашто постоје само три фамилије елементарних честица, да ли теорија СМ важи и на много вишим енергијама од достигнутих данас, да ли заиста живимо у простору са три димензије или је то само неки специјални простор од више димензија,...? Ова и многа друга питања представљају срж истраживачких циљева физике честица данас, а даљи експерименти на LHC-у би могли да понуде или бар олакшају одговоре на нека од њих.

Литература:

- [1] П. Аџић, Детектори честица, Физички факултет, 2021.
- [2] 2008 JINST 3 S08004: The CMS experiment at the CERN LHC
- [3] Observation of a new boson at a mass of 125 GeV with the CMS experiment at the LHC: *Phys.Lett.B* 716 (2012) 30-61



Годишња конференција Научног друштва Србије
ГОДКОН 2024.
31. октобар – 1. новембар 2024. Београд

ГЕОМАГНЕТСКА БУРА – ШТА ЈЕ ТО?

Споменко Ј. Михајловић
геофизичар

АПСТРАКТ

У току дана, по неколико пута, у магнетском пољу Сунца издвајају се велике количине соларне плазме, и такав “енергетски облак” плазме чија маса прелази милијарде тона, избацује се у међупланетарни простор кроз који се радијално шири. Соларна плазма и енергија путује кроз интерпланетарна магнетска поља. Унутар енергетског облака формирају се корпускуларни токови, који се убрзавају до огромних брзина од неколико милиона километара на час. Снажан Сунчев ветар “дува” соларну плазму и магнетску енергију и развијају се соларне олује - нови структурни облик расподеле кретања масе, енергије и плазме у Геопростору. Промене брзине Сунчевог ветра, појаве соларних флорова, ерупције коронске масе и активност коронских шупљина утичу на развој соларних и геомагнетских поремећаја.

Од свих геомагнетских поремећаја, суштински и по садржају, најинтересантније су појаве магнетских или геомагнетских бура. У периоду од 10 - 12. маја 2024. године, регистрована је снажна соларна олуја и интензивна геомагнетска бура. Урађена је анализа соларно геофизичких процеса и промена у соларној и геомагнетској активности, у данима док је трајала мајска геомагнетска бура.

УВОД

Важан механизам за развој геомагнетских поремећаја је магнетска реконекција, односно повезивање интерпланетарног магнетског поља и геомагнетског поља. То је један физички механизам који генерише трансфер соларне плазме и енергије Сунчевог ветра до граница магнетосфере. За настанак и развој геомагнетских поремећаја једнако је важно појављивање јаких и дуготрајних интерпланетарних магнетских поља (тотално поље B_{IMF} и/или јужна компонента B_z/B_s), која су у интерконекцији са транспортом соларне енергије у магнеторепоу, односно у издуженој регији на ноћној, неосунчаној страни магнетосфере (*magnetotail*).

Резултати анализе великог броја соларних и геомагнетских поремећаја, показују да класа соларних олуја и геомагнетских бура имају нека заједничка својства. Промене интензитета геомагнетског поља се дешавају кроз три фазе: почетна, главна и фаза опоравка или смиривања геомагнетске активности (рекурентна фаза). Наведена закономерност у развоју геомагнетских бура намеће дефиницију макроструктурног модела варијација геомагнетског поља регистрованих током трајања геомагнетских бура. Макроструктурном моделу геомагнетских бура одговарају промене различитих облика соларне активности: у активним соларним регионима (центрима активности) појачана је активност групе сунчевих пега, затим промене брзине и јачине Сунчевог ветра, развој и утицај снажних ударних таласа/шокова на границу магнетосфере, појављивање класе најснажнијих соларних флорова и са њима удружених ерупција коронске масе. То би могао бити један стандардни сценарио који приказује различите појаве и феномене који прате соларне олује и геомагнетске буре.

Почетком друге декаде маја 2024. године, у космичким условима регистрована је појачана активност групе сунчевих пега, појава плазмених магнетских облака и повећање брзина Сунчевог ветра. Појачана соларна активност била је означена активношћу коронских ерупција, соларних флорова и коронских шупљина (*CMEs*- Coronal Mass Ejections, *sf*- solar flares, *CH*- Coronal Holes). Промене наведених облика соларне активности које су биле регистроване током трајања соларне олује и геомагнетске буре, одредђују садржај космичког/соларног и магнетског времена (*solar & magnetic space weather*).

Соларни флорови су развијени у околини сунчевих пега и претпоставља се да су за развој соларних флорова одговорни процеси спонтане реконекције линијама силе соларног магнетског поља. Соларни флорови повезују се са короналним избацивањем масе, и током трајања снажних соларних флорова производе се токови високо енергетских честица, које чине Сунчев ветар који долази до границе магнетосфере. Укупна енергија ослобођена флоровима

варира од 10^{19} [J] за класу слабих, до 10^{25} [J] за класу снажних флерова. Део укупне енергије припада електромагнетским таласима, а део енергије се “потроши” на убрзавање честица. Рендгенско зрачење емитовано током активности соларних флерова додатно повећава јонизацију горњих слојева атмосфере, који интерагују са спектром кратких радио-таласа и изазивају појављивање величанствених призора поларне светлости.

Огромна количина присутне магнетске енергије, ако је побуђена неком нестабилношћу или поремећајем у расподели коронског магнетског поља, може покренути избацавање масе и /или коронске ерупције. Највећи број CMEs коронских ерупција дешава се у центрима активности/активним регионима, где су формиране групе сунчевих пега, у чијој околини се појављују соларни флерови. Коронске ерупције су најчешће удружене са појавама соларних флерова. Снажне коронске ерупције изазивају плазмене магнетске облаке и ударне таласе соларних енергетских честица, који узрокују појављивање соларних олуја и геомагнетских бура.

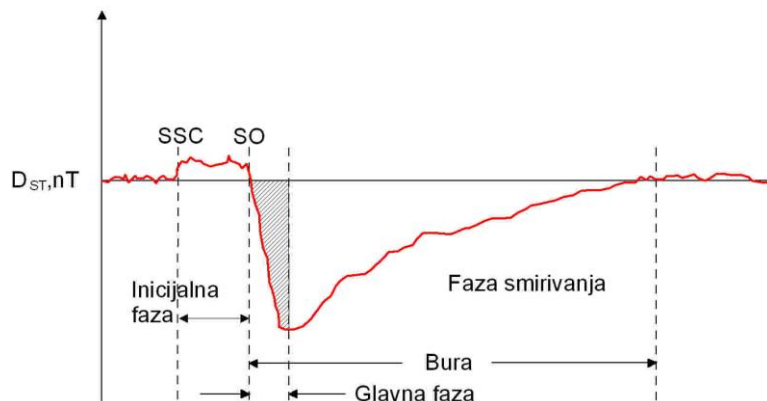
МАКРОСТРУКТУРНИ МОДЕЛ ГЕОМАГНЕТСКИХ БУРА

Према макроструктурном моделу геомагнетских бура, промене геомагнетског поља док траје поремећај се дешавају у три фазе: у почетној, главној и фази смиривања геомагнетске буре. Овим моделом наглашене су основне морфолошке карактеристике бура, развој и дешавање геомагнетске буре кроз три фазе (Слика 1.).

Почетна или иницијална фаза је обележена регистрацијом SSC импулса (SSC - *Sudden Storm Commencement*). Изненадни почетак буре означава долазак ударног таласа из међупланетарног простора на границу магнетосфере. После тог импулса следи изненадна, “скоковита” промена интензитета хоризонталне компоненте геомагнетског поља, од десет и више нано Тесла / минути [$\Delta H/dt > 10 \text{ nT/min}$].

Линија пораста вредности хоризонталне компоненте означава развој почетне фазе геомагнетске буре. Промене су регистроване у кратком интервалу, који може трајати од неколико минута (3 - 5 минута), а понекад и до два-три сата. Статистичка испитивања и анализе показују да почетна фаза може трајати од 30 минута до неколико сати (Слика 1.).

Главна фаза геомагнетске буре почиње интервалом у којем је регистровано смањење интензитета хоризонталне компоненте геомагнетског поља (Слика 1.). Смањење интензитета хоризонталне компоненте геомагнетског поља [dH/dt], или “депресија поља” може трајати од пола сата до десет сати, а понекад више од двадесет четири сата, а максималне промене хоризонталне компоненте (смањивање и/или повећавање вредности), више од стотину нано Тесла, односно [$(dH/dt) < -100 \text{ nT}$].



Слика 1. Макроструктурни модел геомагнетских бура
Почетна/иницијална фаза (*the Initial phase*)
Главна фаза (*the Main phase*)
фаза опоравка/смиривања (*the Recovery phase*)
Почетак магнетске бури (*the SSC impulse- Sudden Storm Commencement*)
(Изворник: Михајловић С.Ј., КЊИГА 1. ЕНЦИКЛОПЕДИЈА
МАГНЕТСКИХ БУРА; Београд, 2017.)

Када вредности хоризонталне компоненте почињу да “се враћају” на ниво пре регистрације бури, може се рећи да почиње фаза смиривања геомагнетске бури. Она може да траје од дванаест до двадесетчетири и више сати, или понекад и до неколико дана.

РАЗВОЈ СОЛАРНЕ ОЛУЈЕ У МАЈУ 2024. ГОДИНЕ

У периоду од 10-12. маја 2024. године, у соларној активности била је регистрована соларна олуја, која је била праћена развојем геомагнетског поремећаја. У активним регионима (AR- Active Regions, центри активности) појавила се велика и сложена група сунчевих пега NOAA AR 3664. Опсервиран активни соларни регион, у периоду од 10-12. маја 2024. године, био је извор снажних корпускуларних токова, и у њему регистрована активност утицала је на промену брзине Сунчевог ветра. Била је регистрована активност снажних соларних флерова и појављивање магнетских облака плазме. На Слици 2. приказан је део Геопростора у којем је регистрована снажна соларна олуја. На Слици 3. на соларном диску приказан је активни регион са групом сунчевих пега (снимак лево), као и флерска активност са протонском олујом (снимак у средини), и снимак ауроралног појаса за датум:

11/05/2024. Године (снимак десно) (Изворник: сајт STCE-
<https://www.stce.be/newsletter>).

На соларном диску, у посматраном активном региону NOAA AR 3664, током наведеног временског периода, била је посматарна разнородна флерска активност: било је регистровано соларних флерова класе C, затим флерова класе M (укупно 75), као и оних најснажнијих соларних флерова класе X (укупно 10). У активном сунчевом региону NOAA AR 3664, дошло је до развоја најинтензивнијег соларног флера GOES X5.8, у којем је регистрована максимална доза зрачења. (Слика 4.а,б) (Изворник: сајт STCE-
<https://www.stce.be/newsletter/>).

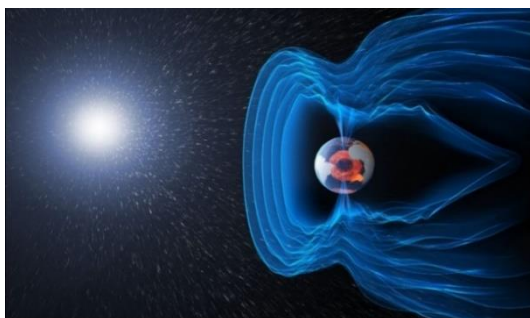
У активном сунчевом региону NOAA AR 3664, удружене са најинтензивнијом флерском активношћу, биле су регистроване ерупције коронске масе (CMEs) које су произвеле пораст брзине Сунчевог ветра од 670 (km/s), 08. маја до брзине од 800 (km/s) 09. маја 2024. године (снимак коронских ерупција је урађен камерама SOHO/LASCO-C2).

Активности најинтензивнијих соларних флерова и ерупције коронске масе биле су настављене 10. маја 2024. године, и то је узроковало пораст брзине Сунчевог ветра око 950 km/s. Током наредног дана у активном соларном региону NOAA AR 3664, био је регистрован најинтензивнији соларни флер GOES X5.8, и његова активност је трајала удружена са снажним ерупцијама коронске масе (CMEs), које су изазвале пораст брзине Сунчевог ветра на вредности око 1050 km/s (Снимак коронских ерупција је урађен камерама SOHO/LASCO-C2, Датум: 11/05/2024.).

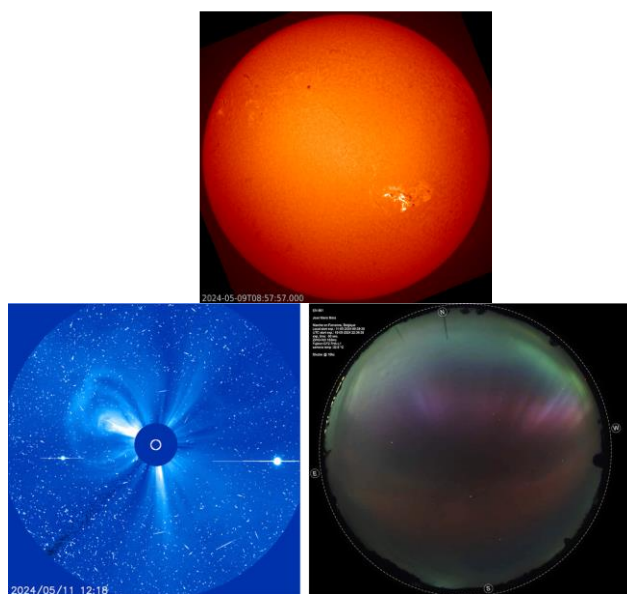
У центру сунчеве активности NOAA AR 3664, током 10. маја 2024. године у интервалу од 13 30 UT, било је забележено повећање протонског флуksа 10 MeV са граничним вредностима од 10 *pfu* јединица (*pfu* - *particles flux unite*). Пораст вредности протонског флуksа од 50 MeV са вредностима од 10 *pfu* јединица, био је регистрован 11. маја 2024. године, у интервалу од 01 40 до 05 50 UT. Потонски флуks од 100 MeV (са граничним вредностима од 10 *pfu* јединица), био је у порасту у интервалу од 01 40 UT, 11. маја 2024. године.

Услови у соларној активности током 10. маја 2024. године били су одређени процесима који су повезани са снажним ударним шоком, у којем је доминирала активност интерпланетарних коронских ерупција, односно најинтензивнијих ерупција коронске масе (ICMEs/CMEs). Тога дана био је регистрован пораст брзине Сунчевог ветра од 460 до 700, односно до 800 (km/s). Промене брзине су биле у корелацији са промена јачине/снаге међупланетарног магнетског поља (IMF-Interplanetary Magnetic Field) од $B_{IMF} = 4$ до 44 (nT), па онда до вредности око $B_{IMF} = 74$ (nT). Затим су биле регистроване промене интензитета вертикалне или јужне компоненте IMFа од око $B_z = -12$ до -50 (nT), као и промене “скок” вредности густине Сунчевог ветра од 5 до 30 честица по cm^3 (*particles/cm³*). Током наредног ударног шока, 11. маја 2024. године брзина

Сунчевог ветра је порасла од 830 до 900 (km/s), а јачина IMF-међупланетарног магнетског поља је порасла од вредности $B_{IMF} = 8$ до 47 (nT).



Слика 2. Соларна олуја
(Изворник: [ESA](#) / [Space Safety](#) / [Space weather](#))

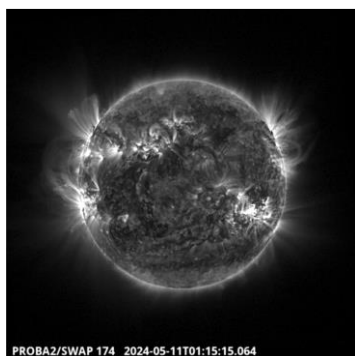


Слика 3. Центри активности са групом сунчевих пега, ефекти соларне олује и геомагнетске буре

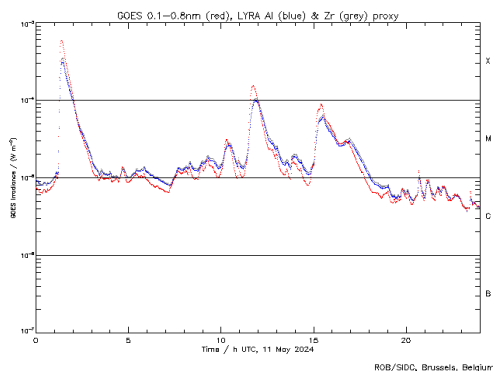
Снимак активног сунчевог региона са групом сунчевих пега (снимак лево)
Протонска олуја (снимак у средини): Сјајна тачка на левој страни слике је снимак Јупитера, а сјајна тачка на десној страни слике је снимак Венере.

Снимак Ауроре – поларног светла (десно); Датум: 11/05/2024.

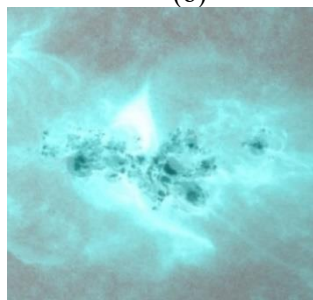
(Изворник: сајт STCE-<https://www.stce.be/newsletter>)



(a)



(б)



(в)

Слика 4. Центри активности са групом сунчевих пега, флерска активност и снажне коронске ерупције

(a) Активни сунчев регион са групом сунчевих пега NOAA 3664; (Датум: 11/05/2024.) (Изворник: сајт USET - <https://www.sidc.be/uset/>)

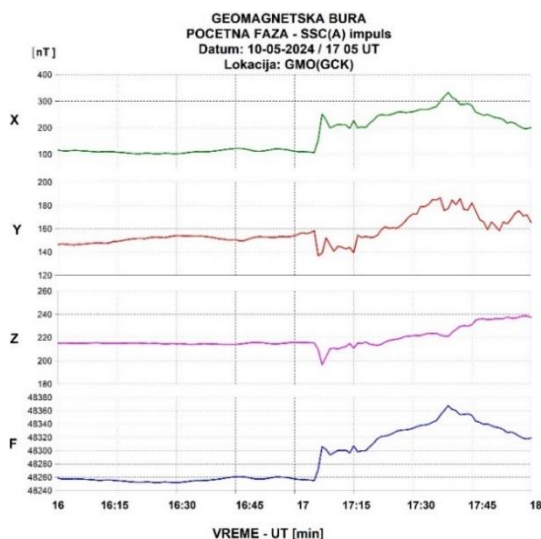
(б) Активност класе соларних флерова X5.8 која је регистрована у активном сунчевом региону NOAA 3664; Датум: 11/05/2024 (снимак урађен са LYRA и SWAP)

(в) Регистрације CMEs снажних коронских ерупција (CMEs снимљен са SOHO/LASCO-C2) Датум: 11/05/2024. у 01 15 UT (Изворник: сајт STCE-<https://www.stce.be/newsletter/>)

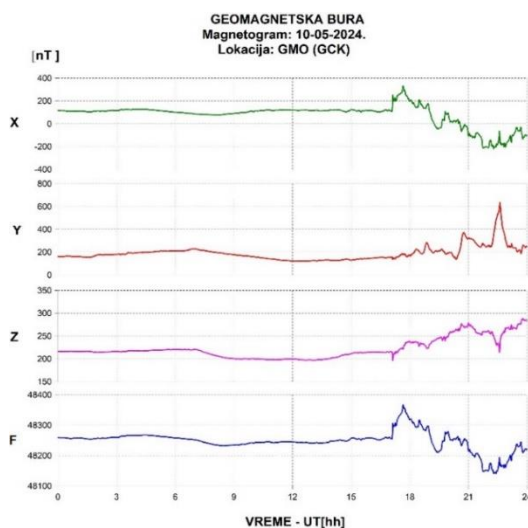
РАЗВОЈ МАЈСКЕ ГЕОМАГНЕТСКЕ БУРЕ

Геомагнетска бура је почела регистрацијом изненадног импулса SSC (A): /10.05.2024.; 17 05 UT/ (Слика 5. и 6.). Сигнал који означава почетак буре, импулс SSC(A) имао је амплитуду: $dX=+47.9$ nT/min; $dY=+21.6$ nT/min; $dZ=+5.8$ nT/min (SSC-*Sudden Storm Comments*). У временском интервалу од 17 05 до 17 08 UT, регистровани SSC(A) импулс је достигао максималну

промену од $[dX/dt = +144 \text{ nT/min}]$. На Слици 5. приказана је регистрација изненадног почетка геомагнетске бури, односно SSC (A) импулса, датум: 10.05.2024./16 00 - 17 00 UT/, а почетна фаза геомагнетске бури регистроване на Геомагнетској опсерваторији Гроцка ГМО (ГЦК) приказана је на Слици 6.



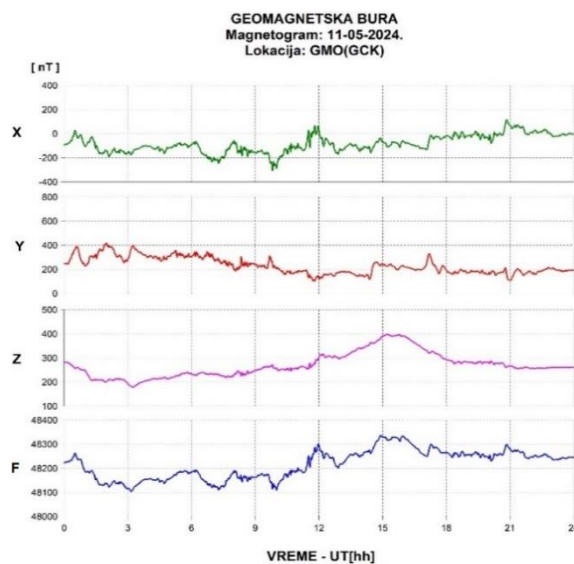
Слика 5. Мајска геомагнетска бура: Регистрација SSC(A) импулса
Датум:10/05/2024. / (16 00 – 17 00 UT)



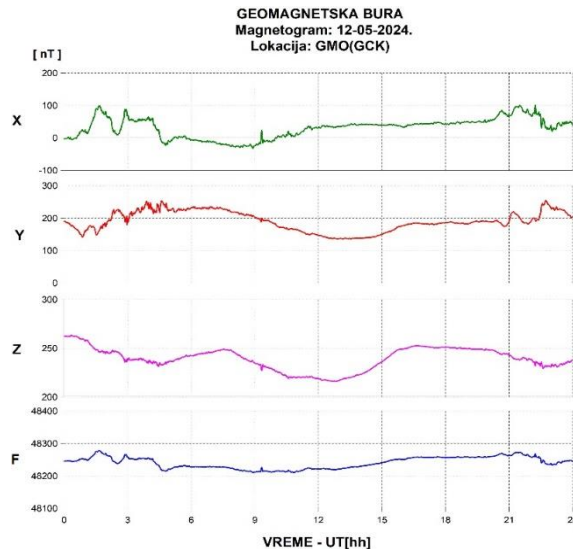
Слика 6. Мајска геомагнетска бура - Почетна фаза
Датум:10/05/2024.

Максимална амплитуда почетка геомагнетске буре, односно “изненадног импулса“, била је посебна карактеристика ове буре, која није била забележена у структури варијација које су регистроване у класи геомагнетских бура у претходна два соларна циклуса. У интервалу од 30 до 35 минута, односно од 17 08 до 17 40 UT била је регистрована почетна фаза магнетске буре (Слика 5. и 6.).

Главна фаза геомагнетске буре је трајала од /17 40 UT; 10.05.2024./ до /06 UT; 12.05. 2024./, када су регистроване промене хоризонталне компоненте геомагнетског поља, од максималне вредности [$dX/dt = +332.6 \text{ nT}$] до минималне вредности од [$dX/dt = -219.7 \text{ nT/min}$], и онда би то значило да је регистрована максимална амплитуда средње минутних варијација хоризонталне компоненте геомагнетског поља износила [$dX/dt = +552.3 \text{ nT}$] (Слика 6.и 7.).



Слика 7. Мајска геомагнетска бура - Главна фаза
Датум: 11/05/2024.



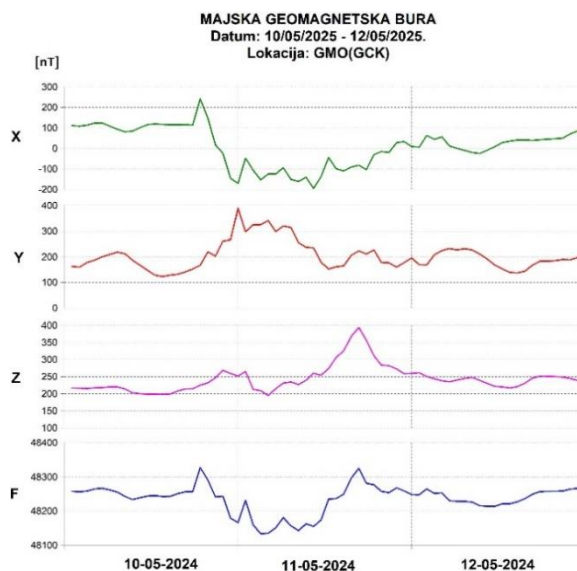
Слика 8. Мајска геомагнетска бура – Фаза опоравка
Датум:12/05/2024.

У главној фази геомагнетске буре били су регистровани опсерваторијски максимални трочасовних индекси геомагнетске активности $K_{GCK} = 9$. Адекватна амплитуда (A_a) која одговара максималном опсерваторијском индексу геомагнетске активности ($K_{GCK}=9$) има вредност од [$A_a \geq 350$ nT]. Првог дана када су регистровани поремећени услови у геомагнетској активности, односно 10.05.2025. године у интервалу од 21-24 UT, био је регистрован максималан индекс (расподела планетарног индекса: $K_p=2-2-3-3-5-8-8-9$; опсерваторијског индекса: $K_{GCK}=3-3-3-3-5-8-8-9$), у главној фази геомагнетске буре 11.05.2025. године, у интервалу од 09-12 UT ($K_p=7-6-6-9-7-7-6-6$; $K_{GCK}=7-6-7-9-7-7-7-6$).

У фази опоравка буре током 12.05.2025. године (Слика 8.) били су регистровани умерено поремећени услови, изражени индексима геомагнетске активности ($K_p=6-5-3-4-2-3-4-5$; $K_{GCK}=6-6-3-4-2-2-4-5$) (Изворник: сајт STCE-<https://www.stce.be/newsletter/>, регистрације K_p планетарног индекса геомагнетске активности; Месечни извештај-индекси геомагнетске активности на Геомагнетској опсерваторији Гроцка (ГМО-ГЦК)).

Морфологија D_{st} варијације, која је регистрована у време трајања мајске геомагнетске буре од 10/05/2024.- 12/05/2024. године, на Геомагнетској опсерваторији Гроцка (ГЦК), приказана је на Слици 9. У структури D_{st} варијације (t_{st} - *storm time*), која је дефинисана средње часовним вредностима

северне (хоризонталне) компоненте вектора геомагнетског поља, биле су регистроване вредности: $dX/dt = +240.7 \text{ nT}$; датум: 10.05.2024./ 18 00 UT/, до вредности: $dX/dt = -195.3 \text{ nT}$; датум: 11.05.2024./ 10 00 UT/.



Слика 9. Мајска геомагнетска бура - морфологија D_{st} варијације
Датум: 10/05/2024 – 12/05/2024.
Локација: Геомагнетска опсерваторија Гроцка - ГМО(ГЦК)

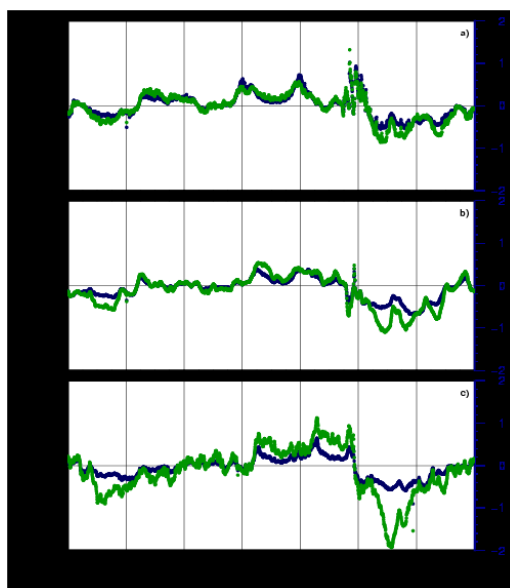
У временском интервалу док је трајала ова бура била је регистрована максимална амплитуда, односно ранг мајске геомагнетске буре [$dX/dt = 436 \text{ nT}$]. Резултати анализе D_{st} варијације се могу упоредити са планетарним индексом поремећаја, који је имао максималну амплитуду од [$D_{ST} = -403 \text{ nT}$] (D_{ST} -The Disturbance storm-time index, односи се на регистровану мајску магнетску буру); (Изворник: сајт <https://www.sidc.be/uset/>).

У периоду од 10.05.-12.05. 2024. године била је регистрована мајска геомагнетска бура. На основу анализе варијација геомагнетског поља, ова бура припада класи великих, интензивних геомагнетских буре.

Развој соларно геофизичких поремећаја, сунчева радијација и различити облици космичког времена могу да утичу на структуру, односно карактеристике јоносфере. Када се мења јачина и снага сунчевог зрачења, нарочито промене спектра UV зрака и рентгенски зраци (x -зраци), мењају се стање, процеси и услови у јоносфери. Удари снажних соларних флорова могу бити узроци промена у јоносфери, у дневном сектору/страни. Када се плазмени магнетски облак приближи на блиска растојања од неколико пречника Земље,

например од 5 до 6 R_E (пречник Земље: $R_E = 6353 \text{ km}$), притисак на магнетосферу се појачава и тада долази до развоја геомагнетских бура. Геомагнетске буре даље утичу на стање и процесе у јоносфери, и могу да изазивају различите поремећаје и/или јоносферске буре. Регистровани јоносферски поремећаји могу ометати радио комуникацију и сателитску навигацију.

На Слици 10. приказана је расподела параметра вертикалног укупног електронског садржаја (VTEC – *Vertical Total Electron Content*), у периоду од од 06-12. маја 2024. године на три станице (локације) у Европи које су распоређене на различитим географским ширинама. Плава боја на дијаграму приказује мирне/редовне услове у јоносфери, изражене медијаним вредностима параметра VTEC, а зеленом линијом су приказани нерегуларни услови у јоносфери (пример регистрованог јоносферског поремећаја од 10-12. маја 2024. године).



Слика 10. Расподела параметра вертикалног укупног електронског садржаја у периоду од од 06-12. маја 2024. године на три станице у Европи (VTEC – *Vertical Total Electron Content*)

- a) северни део Европе (N 61°; E 5°)
- b) над средњом Европом (N 50,5°; E 4.5°)
- c) јужни део Европе (N 36°; E 5°)

ЗАКЉУЧАК

Структуру мајске геомагнетске буре (10/05–12/05/2025. године) је обележило неколико посебних својстава:

а) Регистровани SSC (A) сигнал, којим је означен нагли, изненадни почетак геомагнетске буре, имао је амплитуду од $[dX/dt = +47.9 \text{ nT/min; /10.05.2024./17 05 UT/}]$. Био је то сигнал који припада класи најинтензивнијих импулса (A класа).

б) После изненадног почетка, регистрована је краткотрајна почетна фаза геомагнетске буре, која је трајала око 30 - 35 минута, од 17 08 до 17 40 UT; /10.05.2024./.

в) У главној фази геомагнетске буре били су регистровани опсерваторијски максимални трочасовних индекси геомагнетске активности $K_{GCK} = 9$, респективно: 10/05/2025./ интервал 21-24 UT; и 11.05.2025./ интервал 09-12 UT.

г) У развоју главне фазе геомагнетске буре, која је трајала око 40 сати, била је регистрована максимална амплитуда средње минутних варијација хоризонталне компоненте геомагнетског поља од око $[dX/dt = +552.3 \text{ nT}]$. Максимална амплитуда средње часовних варијација северне компоненте геомагнетског поља износила је око $[dX/dt = 436 \text{ nT}]$. Максималну амплитуду D_{st} варијације регистроване током трајања мајске геомагнетске буре, могуће је упоредити са максималном амплитудом планетарног индекса поремећаја од $[D_{ST} = -403 \text{ nT}]$.

д) На основу анализе макроструктурног модела регистрованих варијација геомагнетског поља (SSC (A) импулс, D_{st} варијација, D_{ST} индекс поремећаја, ранг геомагнетске буре), може се мајска геомагнетска бура дефинисати као велика, интензивна геомагнетска бура (*BMS - Big Magnetic Storm*; Михајловић С.Ј., 2017.). Према класификацији која је усвојена од стране NOAA SWP Центра у Боулдеру, Колорадо, САД, регистрована мајска геомагнетска бура припада класи G5, односно била је то изузетно снажна (интензивна, јака) бура (*G5 - Extremely severe geomagnetic storm*; изворник: NOAA, Space Weather Prediction Center, Boulder, CO, USA; 2024.)

РЕФЕРЕНЦЕ

1. Akasofu S.-I. and Chapman S.; A Study of magnetic Storms and Auroras; Scientific Report No.7.; GEOPHYSICAL INSTITUTE of the UNIVERSITY of ALASKA; March, 1961.
2. Akasofu S.-I. and Chapman S.; *Solar – Terrestrial Physics, Chapter V -VIII*; Oxford University; 1972.

3. Bartels J., "Discussion of Time-Variations of Geomagnetic Activity, Indices Kp and Ap, 1932-1961", *Extrait des ANNALES DE GEOPHYSIQUE; Tome 19*, No.1.; Janvier- Mars 1963.
4. Bouška J., "Some structural characteristic of a geomagnetic storm"; *Geophysic Sbornik XX* (1972); Academia; Praha, 1972.
5. Cander R. LJ. and Mihajlovic J.S.; Forecasting ionospheric structure during the great geomagnetic storms; *J. Geophys. Res.*; Vol. 103, NO. A1, pp. 391- 398, January 1, 1998.
6. Cander R. LJ. and Mihajlovic J.S.; Ionospheric spatial and temporal variations during the 29-31 October 2003 storm; *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 67 (2005), pp. 1118-1128; Elsevier Ltd., 2005.
7. Михајловић Ј.С.; "Соларно- геофизички процеси и геомагнетски поремећаји", *10. Конгрес физичара Југославије; Зборник радова*, Књига II; pp.913-920.; Југословенско Друштво Физичара; Београд; 2000.
8. Mihajlović S.J.; Čop R.; Palangio P.; 2010; THE STRUCTURE OF THE BIG MAGNETIC STORMS; *Geologica Macedonica*; Vol.24. No.1, pp.1-12 (2010), Štip, Macedonia, 2010.
9. Михајловић Ј.С., КЊИГА 1. ЕНЦИКЛОПЕДИЈА МАГНЕТСКИХ БУРА; Партенон, Београд, 2017.
10. Tsurutani B.T., et all; "Magnetic Storms"; Geophysical Monograph, Series 98; American Geophysical Union (AGU); Washington, DC, USA;1998.
11. Tsurutani B.T.; Gonzalez W.D.; et all.; Prediction of peak-D_{st} from halo CME/magnetic cloud-speed observations", *JASTP*, Vol.66.; No.2., January,2004; pp 161-165.;Published in Association with U.R.S.I.; Elsevier Ltd.; 2004.



Годишња конференција Научног друштва Србије
ГОДКОН 2024.
31. октобар – 1. новембар 2024. Београд

Енергетска ефикасност 5Г мобилних мрежа и одрживи развој 6Г технологија

**Зоран Бојковић
Драгорад Миловановић
Универзитет у Београду, Република Србија**

АПСТРАКТ

Циљ истраживања, развоја и интеграције нових дигиталних информационо-комуникационих технологија је побољшање перформанси мобилних мрежа и апликација, али и истовремено смањење потрошње електричне енергије, количине отпада и минимални утицај на животну средину. Одрживост све више постаје значајан циљ пројектовања 5G/6G мрежа, подстичући избор нових технологија и интелигентне инжењерске системе за постизање ефикасних решења. У предходних 5 година публиковали смо радове који су обухватили развој 5Г технологија мултимедијалних комуникација, напредне техничке спецификације, стандардизоване мрежне архитектуре, као и одрживе инжењерске системе. Истражили смо кључне стратегије за постизање енергетске ефикасности мрежа, али и фундаментална и практична ограничења, тако да је неизбежан компромис утрошене енергије и перформанси. Са друге стране, очекује се да 5G/6G мреже подстакну глобални раст и продуктивност, створе нове пословне моделе и трансформише многе аспекте друштва (саобраћај и логистика, енергетика и рударство, индустрија и пољопривреда, здравство и образовање). Неопходно је друштвено одрживи развој ових система утемељити у заједници, што значи да је употреба ресурса добро мотивисана и објашњена. Неопходно је минимизирати сваки негативан утицај мрежа на одрживост. На нивоу системских ограничења, анализирали смо неизбежна основна ограничења (мрежна ефикасност, управљање мрежом, безбедност мреже) и компромисе оптимизације, као и савремене активности на стандардизацији глобалних техничких спецификација. Анализирали смо

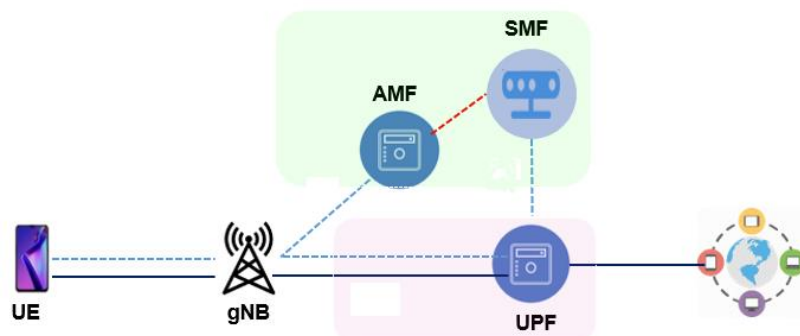
захтеве значајних случајева употребе (екстремно имерсивно искуство усмерено на човека, интелигентна масивна конекција, Индустрија 4.0 са пуним капацитетом и даље, паметни градови). Наглашавамо да развој и имплементација нове генерације 6Г мобилних мрежа захтева и праксе усклађене са УН циљевима одрживог развоја до 2030. године.

УВОД

Бројне студије и технолошки напредак у области енергетске ефикасности и обновљивих бежичних комуникација и умрежавања су направљени у настојању да се смањи велика потрошња енергије бежичних система. Академске, индустријске и владине институције раде на плановима који максимизирају енергетску ефикасност 5G мрежа. Циљ је да се очува покривеност, капацитет и квалитет услуге уз смањење потрошње енергије кроз уштеду енергије. Императив је одржавати константну или чак нижу потрошњу енергије мобилне мреже нових генерација уз значајно повећање капацитета мреже.

У 5G деценији након 2020. очекује се значајан пораст потрошње енергије и емисије угљеника бежичних комуникационих мрежа. Кључ је ефикасно коришћење доступног спектра на умереним нивоима снаге. У циљу постизања оптималне уштеде енергије, управљање напајањем је дизајнирано да се прилагоди тренутним и предвиђеним оптерећењима мрежног саобраћаја. Кључни захтев за развој 5G мреже и стандардизацију техничких спецификација је енергетска ефикасност. Консолидација ресурса, селективне везе и виртуелизација су основни концепти за постизање енергетски ефикасне архитектуре 5G мреже. Сви профили мерења, метрике, технике и профили тестирања морају бити дефинисани да би се процениле перформансе.

Организација за развој стандардизованих техничких спецификација 3GPP дефинише 5G окосницу мреже која користи виртуелизацију рачунарског облака CC, архитектуру засновану на услугама SBA у свим функцијама и процедурама, укључујући аутентификацију, безбедност, управљање сесијом и агрегацију саобраћаја са крајњих уређаја UE. Основна мрежа подржава виртуелизацију софтверских функција за коришћење NFVI у дизајнирању 5G мрежа укључујући MEC инфраструктуру. Нова архитектура је заснована на раздвајању функција корисничке равни и контролне равни што омогућава независно скалирање функција, нпр. оператор мобилне мреже може додати више функција корисничког нивоа без додавања више контролне равни и обрнуто у зависности од стратегије примене. Функције корисничког нивоа су дистрибуиране и географски близу приступне мреже RAN како би се минимизирала латенција корисничке равни, док су функције контролне равни централизоване како би се искористиле предности виртуелизације (Слика 1).



Слика 1. 5G мобилна мрежа: кориснички уређај (UE), базна станица (gNB), окосница мреже (корисничка раван UPF, управљачка раван AMF+SMF).

Развијање енергетски ефикасних технологија 5G представља значајан изазов у односу на претходне генерације комуникационих мрежа. Енергетска ефикасност директно утиче на економске и еколошке изазове са којима се суочавају бежичне мреже, тако да је примарна компонента одрживих мобилних комуникација:

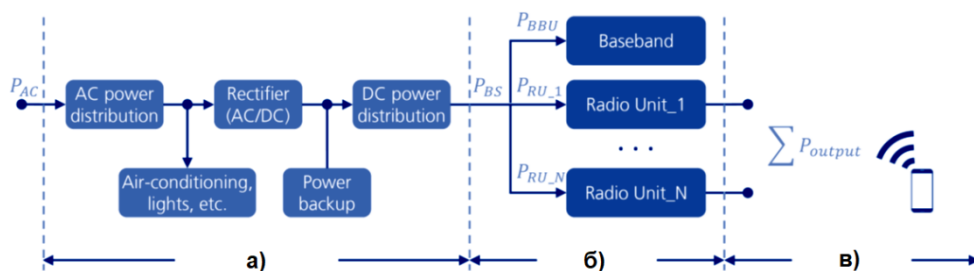
- Постојеће мреже су дизајниране да повећају снагу преноса како би се максимизирао капацитет. Међутим, оваква стратегија је неодржива с обзиром на то колико брзо расте број повезаних уређаја. Оперативни трошкови расту на неприхватљиво висок ниво ако се капацитет комуникација повећава континуираном употребом више енергије. Стога, само повећање снаге преноса неће резултирати очекиваним повећањем капацитета постојећих бежичних комуникационих система.
- Конвенционални извори енергије на бази угљеника C су примарни извор електричне енергије за садашње бежичне комуникационе системе. Упоредиво са емисијом угљеника у индустрији авионике, стварни системи информационих и комуникационих технологија чине 5% глобалне емисије CO₂. У бежичној заједници постоји универзална сагласност око једног значајног циља: повећање капацитета од 1000× требало би да се постигне при потрошњи енергије која је упоредива или мања у постојећим мрежама.

ПОТРОШЊА ЕНЕРГИЈЕ У МОБИЛНИМ МРЕЖАМА

Еволуција мобилних мрежа од увођења прве генерације 1G система до 5G-Advanced ка 6G, јасно указује на пораст инсталиране мрежне опреме и преношеног саобраћаја. Упркос већој ефикасности нових генерација, потрошња енергије (EC) неизбежно расте, тако да се не могу занемарити

економски и еколошки утицаји. Већа потрошња значи више трошкова за оператере мобилних мрежа и већи угљенични отисак. Индустрија комуникација стога мора да развије стратегије за оптимизацију енергетске ефикасности 5G мрежа, без угрожавања перформанси. Међутим, развој енергетски ефикасних технологија је значајан изазов.

Са RAN стране, KPI енергетске ефикасности је такође представљен различитим метрикама које се односе на фокус подкомпоненти мреже. Укупна енергетска ефикасност се састоји од три фактора: енергетске ефикасности инфраструктуре локације, енергетске ефикасности опреме базне станице и енергетских перформанси ваздушног интерфејса. P_{AC} је улаз наизменичне струје из мреже, P_{BS} DC улазна снага за главну опрему (базна станица), P_{output} је излазна снага антене базне станице на врху кабинета, а S_{PI} услуга коју пружа базна станица (испоручени битови, покривеност, или број претплатника које опслужује базна станица). Укупне енергетске перформансе представљају $EP = S_{PI}/P_{AC}$, $SiteEE = P_{BS}/P_{AC}$, $BaseStationEE = \Sigma P_{output}/P_{BS}$, $RadioEE = \Sigma S_{PI}/\Sigma P_{output}$. Релације интегрисане у специфицираним временским интервалима изражавају се у [Mbits/kWh] или [Mbits/J]. Укупне енергетске перформансе изражавају се релацијама $EP = S_{PI}/P_{AC}$, $SiteEE = P_{BS}/P_{AC}$, $BaseStationEE = \Sigma P_{output}/P_{BS}$, $RadioEE = \Sigma S_{PI}/\Sigma P_{output}$ (Слика 2).



Слика 2. Укупна RAN енергетска ефикасност 5G мреже: а) енергетска ефикасност инфраструктуре локације, б) енергетска ефикасност опреме базне станице и в) енергетске перформансе ваздушног интерфејса.

Енергетски модели и сродне метрике

Да би се проценила потрошња енергије 5G мрежа, развијен је модел потрошње енергије базних станица (BS). Енергетска ефикасност мреже зависи од ниске потрошње енергије када је саобраћајно оптерећење мало. Када је саобраћајно оптерећење велико, енергетску ефикасност (EE) карактерише ефикасан пренос података (средња спектрална ефикасност SE). Међутим, постоје фундаментална и практична ограничења, тако да је компромис између перформанси и енергије неизбежан.

Методе оптимизације енергетске ефикасности засноване на једном критеријуму максимизирају или спектралну ефикасност или енергетску ефикасност да би се добиле боље просечне перформансе. Вишекритеријумска оптимизација се приближава основним границама вршних перформанси у заједничкој оптимизацији спектралне ефикасности и енергетске ефикасности, што подразумева коришћење компромиса зато што оптимум није јединствен. Поред тога, од суштинског је значаја да 5G бежичне мреже побољшају ЕЕ са гарантованим QoS/QoE за мултимедијалне услуге осетљиве на време.

Кључ за повећање енергетске ефикасности је оптимизација употребе радио-спектра по јединици електричне енергије испод границе просечне потрошње у одређеном временском интервалу и максималне потрошње.

Ефикасно управљање напајањем

Захтеви за перформансе ITU-R наводе да потрошња енергије за радио приступну мрежу IMT-2020 не би требало да буде већа од IMT мрежа које су данас распоређене, док истовремено испоручују побољшане 5G могућности. Због тога би енергетску ефикасност мреже требало побољшати за фактор који је минимално као предвиђено повећање капацитета саобраћаја од 5G у односу на 4G за побољшани мобилни широкопојасни приступ. 5G мобилне мреже имају могућност да подрже висок однос привременог искључивања и дуго трајање искључивања, а подстичу се и други механизми за уштеду енергије и за мрежу и за уређаје.

Енергетска ефикасност ЕЕ мреже је способност да се минимизира потрошња енергије радио-приступне мреже у односу на обезбеђени капацитет саобраћаја. Енергетска ефикасност уређаја је способност да се минимизира енергија коју троши модем уређаја у односу на карактеристике саобраћаја. Енергетска ефикасност мреже и уређаја треба да подржава два аспекта: ефикасан пренос података (средња спектрална ефикасност) и мала потрошња енергије када нема података за пренос.

ТЕХНИКЕ И ПЕРФОРМАНСЕ УШТЕДЕ ЕНЕРГИЈЕ

Енергетска ефикасност мобилних мрежа је дуго била важан аспект у 3GPP, од издања Release 9 је specificirana сигнализација базних станица за размену порука које се односе на уштеду енергије мреже. Овај механизам омогућава да базна станица обавести суседе када деактивирају мобилне ћелије за повећање капацитета и обрнуто, суседне базне станице могу да захтевају активацију ћелије. Без обзира на то, укупна потрошња енергије мреже и даље расте због огромног раста мобилних података, који се не надокнађује мерама за уштеду енергије. Поред одрживости, потрошња енергије мреже чини велики део оперативних трошкова (OPEX) у мобилним мрежама.

3GPP наставља да активно тежи уштеди енергије у мрежи из ова два разлога. Дефиниција енергетске ефикасности, индикатора перформанси KPI и техника мерења као средства за карактеризацију случајева и решења за уштеду енергије су недавно разрађени. Иницијатива обухвата екосистем који такође обухвата резултате релевантне за уштеду енергије других главних актера као што су GSMA, ETSI, ITU-T.

3GPP спецификације и методе

3GPP непрестано тежи бржим, поузданијим и одрживијим мобилним мрежама. Еволуција 5G-Advanced обећава револуционарна побољшања у издању 18. Даљи напредак се наставља у издању Release 19 и издању Release 20, фокусирајући се на проширење случајева употребе AI/ML и истраживање 6G могућности.

У издању Release 18, предмет студије SI о уштеди енергије мреже је адресиран да би се идентификовале и процениле потенцијалне технике, које су сажете у техничком извештају 3GPP TR 38.864. Након ставке студија, фаза радне ставке обухватила је стандардизована решења за уштеду енергије мреже.

Штавише, такав предмет студије може поставити темеље за побољшања у даљим издањима 5G NR и на крају и у 6G. Ставка студије је започела дефинисањем моделовања потрошње енергије базне станице, методологије евалуације и индикатори KPI које је неопходно проценити. Такође, идентификоване су и процењене поједине технике које потенцијално могу да побољшају енергетски отисак 5G NR мрежа.

Метрика процене учинка

У 3GPP метрике перформанси су критичне метрике које процењују мрежу или корисника на нивоу система или конекције. 3GPP настоји да прецизира методологију евалуације и кључне индикаторе учинка KPI помоћу којих се упоређују различити приступи који се истражују, а одлука се доноси на основу приступа којим се постиже најбољи учинак.

Актуелне 5G мреже су фокусиране на потрошњу енергије и ефикасност, иако не као примарни критеријум учинка. Стални напори су посвећени побољшању енергетске ефикасности у раду система. Међутим, како се развијамо ка 5G напредним функцијама, енергетска ефикасност постаје основни принцип поред безбедности, приватности и сложености.

Мрежни саобраћај се појављује као примарна покретачка снага и кључни параметар за оптимизацију мрежних компоненти, омогућавајући прилагођавање радио-ресурса кроз временске, фреквенцијске, просторне и енергетске домене као одговор на промене саобраћајног оптерећења.

Корисничка опрема UE је опширно проучавана и бројне метрике перформанси су специфициране за израчунавање укупног добитка из перспективе система или нивоа конекције.

6G ЗЕЛЕНЕ МРЕЖЕ

У постизању циљева одрживог развоја УН, информациона и телекомуникациона индустрија заузима значајну улогу. Све већи број земаља примењује националне законе за праћење и развој потрошње енергије ка већој одрживости.

Мерење и континуирано побољшање енергетске ефикасности мобилних мрежа постаје веома значајно за оператере.

Одрживост животне средине представља способност мреже и уређаја да минимизирају емисије гасова стаклене баште и друге утицаје на животну средину током свог животног циклуса. Значајни фактори обухватају побољшање енергетске ефикасности, минимизирање потрошње енергије и коришћење ресурса, на пример оптимизацијом за дуг животног века опреме, поправке, поновне употребе и рециклаже.

Енергетска ефикасност је квантитативни показатељ одрживости. Односи се на количину пренетих или примљених бита информација по јединици потрошње енергије. Очекује се да енергетска ефикасност на одговарајући начин побољша повећање капацитета како би се укупна потрошња енергије свела на минимум. Неопходно је да нове генерације мобилних система подрже одрживост као основни циљ.

ЗАКЉУЧНА РАЗМАТРАЊА

Нагласили смо растућу потребу за енергетски ефикасном у 5G мобилним мрежама. Фокус је на методама и метрикама, као и техникама за смањење потрошње на нивоу базне станице и мреже. За побољшање уштеде енергије, оптимизација потрошње енергије мреже кроз ефикасне технике управљања енергијом постаје кључни изазов.

Први систематски корак је дефинисање кључних индикатора учинка КРИ као скуп случајева употребе и минималних захтева. Затим, фокус је на истраживању модела потрошње енергије и метрика за процену нових аспеката енергетске ефикасности 5G мрежа. У ствари, неопходно је развити постепену стратегију за постизање побољшане енергетске ефикасности функционалности које се развијају или стандардизују, паралелно са процесом стандардизације 5G.

Потенцијална решења су развој, стандардизација и имплементација функција за уштеду енергије, као и укључивање обновљивих извора енергије и промовисање енергетски ефикасних пракси у мрежној инфраструктури.

Очекује се да 6G мреже следеће генерације остваре зеленије и друштвено неприметне бежичне везе у глобалном обиму. Нова трансформативна технологија подржаће и брже и поузданије случајеве употребе.

Одрживи развој садржи више димензија, економску, друштвену и еколошку а које је неопходно заједно решити. Одрживе информационо-комуникационе технологије имају за циљ смањење отиска у енергији, ресурсима, емисијама, у суштини, осигувава да технологије представљају део одрживог друштва. Кључни изазов за 6G је да заустави повећање потрошње енергије са повећањем саобраћаја. Информационо-комуникационе технологије за одрживост дефинише шта мреже могу да ураде за трансформацију индустрије, заједнице, итд., подржавајући повезаност и интелигенцију путем 6G. Циљ је минимизирање потрошње енергије и ресурса, смањење емисија и унапређење друштвених аспеката.

РЕФЕРЕНЦЕ

1. Fowdur, T.P., Milovanovic, D., Bojkovic, Z. (Eds.), *Intelligent and sustainable engineering systems for Industry 4.0 and beyond*, CRC Press 2025.
2. Milovanovic, D., Bojkovic, Z., Fowdur, T.P. (Eds.), *Driving 5G Mobile communications with Artificial Intelligence towards 6G*, CRC Press 2022.
3. Bojkovic, Z., Milovanovic, D., Fowdur, T.P. (Eds.), *5G Multimedia communications: technology, multiservices, deployment*, CRC Press Oct. 2020.
4. Dahlman, E., Parkvall, S., Skold, J., *5G/5G-Advanced The new generation wireless access technology*, Elsevier 2023.
5. Holma, H., Toskala, A., Nakamura, T. (Eds.), *5G Technology: 3GPP Evolution to 5G-Advanced*, 2nd Edition, Wiley 2024.
6. Milovanović, D., Bojković, Z., Terzija, V., Pantović, V. , Fowdur, P. State-of-the-art Energy-Efficiency in 5G networks: Requirement indicators and evaluation metrics, *Proceedings 3rd International Conference on Emerging Trends in Electrical, Electronic and Communications Engineering ELECOM*, Mauritius, Nov. 25-27, 2020, pp.153-157
7. Chih-Lin, I., Han, S., Bian, S., Energy-efficient 5G for a greener future, *Nature Electronics*, 3(2020) pp.182-184
8. Buzzi, S. et al., A survey of energy-efficient techniques for 5G networks and challenges ahead, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 34(2016), 4, pp.697-709
9. Samdanis, K., Rost, P., Maeder, A., Meo, M., Verikoukis, C. (Eds.), *Green communications: Theoretical fundamentals, algorithms, and applications*, Wiley 2015.

10. ATIS (Alliance for Telecommunications Industry Solutions), Next G Alliance, Green G: The path toward sustainable 6G, 2022.
11. ITU-T L.1331, Assessment of mobile network energy efficiency, Apr. 2017.
12. 3GPP TR 38.913, Study on Scenarios and requirements for Next Generation Access technologies (Release 15), June 2018.
13. 3GPP TR 21.866, Study on Energy Efficiency aspects of 3GPP standards (Release 15), June 2017.
14. ITU-R IMT-2020, M.2083, Vision – Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond, Oct. 2015.
15. ITU-R IMT-2030, M.2160, Vision – Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2030 and beyond, Nov. 2023.
16. 3GPP TR 32.972, Study on system and functional aspects of energy efficiency in 5G networks (Release 16), Sept. 2019.
17. 3GPP TS 28.310 Energy efficiency of 5G (Release 16), May 2020.
18. 3GPP TS 28.813 Study on new aspects of Energy Efficiency (EE) for 5G (Release 17), June 2020.



Годишња конференција Научног друштва Србије
ГОДКОН 2024.
31. октобар – 1. новембар 2024. Београд

КРИЗА ВОДЕ И ШТА ПРЕДУЗИМАТИ – РЕШЕЊА ИЗ НОВОГ ПРОСТОРНОГ ПЛАНА РЕПУБЛИКЕ СРБИЈЕ

Бранислав Ђорђевић

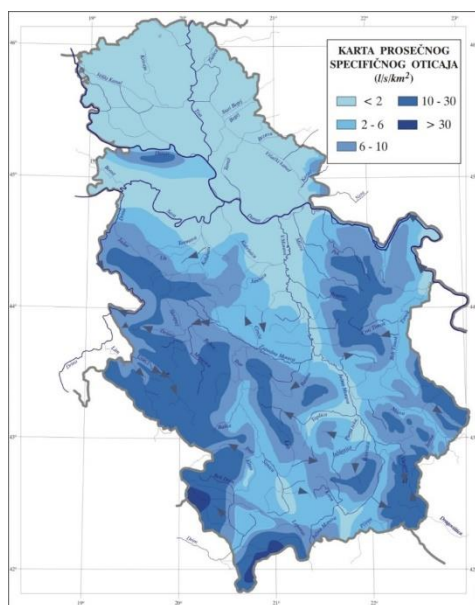
Научно друштво Србије, ред. члан Академије инжењерских наука
Србије

АПСТРАКТ

Нови Просторни план Републике Србије (ППРС) чека на усвајање у Скупштини Србије. ППРС дефинише неопходне објекте и мере које треба да обезбеде поуздано снабдевање водом насеља и свих других корисника вода, да дефинише системе и мере заштите од поплава и да утврди начине заштите квалитета вода и одржавање водотока на еколошки прихватљивим нивоима квалитета. У складу са чињеницом да је Србија водом сиромашна земља, са веома неравномерном расподелом вода и по простору и по времену, у циљу рационализације коришћења вода и средстава ППРС предвиђа развој две класе система: а) регионални системи за снабдевање водом насеља и других корисника који захтевају воду највишег квалитета; б) речни системи у оквиру којих се реализују мере заштите од поплава, хидроелектране, системи за наводњавање, и спроводе мере заштите квалитета вода. Због велике неравномерности вода неопходне су и акумулације да би се вода пребацивала у маловодне реоне, као и да би се обезбедиле потреба за водом у временски све дужим и критичнијим маловодним периодима. ППРС обухвата само оне локације акумулација које су заиста неопходне, да би се обезбедила поузданост снабдевања водом и заштита од поплава. Планом се дефинишу и приоритети у реализацији објеката и система.

УВОД

Стање водних ресурса Србије. Србија је водом сиромашна земља и када се разматра по просечним вредностима. Просечни годишњи проток домаћих вода у целој Србији је $505 \text{ m}^3/\text{s}$ (без КиМ: $425 \text{ m}^3/\text{s}$), што износи око 1.700 m^3 по становнику годишње. Сматра се да је за потребно око $2.200\text{--}2.500 \text{ m}^3$ по станов.год. за потпуно задовољење потреба за водом једне земље. Србија има мање од тога, па ће морати да спроводи стриктну рационализацију и да се ослања и на коришћење транзитних вода (Дунав, Сава, Тиса, Дрина), што је све неизвесније и по количини и по квалитету које не можемо да контролишемо. Проблем је што се укупне домаће воде у све дужим маловодним периодима спуштају испод $40 \text{ m}^3/\text{s}$, када земља доживљава велику кризу, а ти периоди су меродавни за планирање водопривредних система. У условима климатских промена ти периоди биће све дужи, са све мањим протоцима, што решења водопривредних система чини још сложенијим.



Сл.1: Специфични отицаји L/s.km^2

Посебан проблем је велика неравномерност протока по простору и времену. Веће падавине и протицаји су у планинским подручјима, већим делом по рубним деловима земље, док су најмањи протоци управо у равничарским подручјима, у којима су због насеља, наводњавања и привреде највеће потребе за водом. То је својеврсни ресурсни парадокс: воде има најмање тамо где је најпотребнија. У Шумадији, Војводини, доњем делу слива Колубаре, деловима Поморавља просечна расположивост вода је најмања, често мања од 500 m^3 по станов.год. То значи да се у те зоне вода мора доводити из удаљених планинских зона, у којима се могу реализовати акумулације. Специфични протицај у Србији је $5,7 \text{ m}^3/\text{s.km}^2$, али се креће у широком распону, од око $1 \text{ m}^3/\text{s.km}^2$ у маловодним зонама Војводине, Шумадије, па до $30 \text{ m}^3/\text{s.km}^2$ у неким планинским зонама. То се види на слици 1, на којој је дат приказа расподеле специфичног отицаја на територији Србије. Колико је стање сложено види се на примеру Мокре горе (Тутинске). Ту су највеће падавине и највећи отицај, већи од $30 \text{ m}^3/\text{s.km}^2$, али и то подручје је

угрожено у маловодним периодима, јер због дубоког базиса карстификације вода понире и појављује се тек на врелима на нижим хоризонтима.

Подземне воде су највећим делом алувијалног порекла, са прихрањивањем из водотока, па тако сnose судбину површинских вода, са великим смањењем издашности у кризним маловодним периодима. Тада се јаве тешки проблеми у многим мањим водоводима који се ослањају искључиво на врела или бунаре. Пример је Пештерски водовод који се ослања искључиво на врела која у новије време пресушују или им се значајно смањи капацитет. Војводина користи подземне воде са велике дубине, 100-150 m, које се веома споро обнављају, па се у зони великих потрошача већ очитују обарања нивоа и за преко 50 m.

Србија користи транзитне воде (пример: ХС ДТД), али се због опште кризе воде припремају ограничења захватања, што ће изазвати велике проблеме у Војводини.

Посебне тешкоће ствара врло велика неравномерност протока по времену. Водни режими на рекама Србије су изразито бујични: у краткотрајном бујичном поводу протекне и преко 50% од просечног годишњег протока, а затим наступе дуги периоди маловођа. На неким мањим рекама однос протока малих вода тзв. 95% обезбеђености (мала вода меродавна за мере заштите квалитета вода) и великих вода вероватноће 1% (велике воде са којима се димензионишу неки системи заштите од поплава) износи преко 1: 2.000, што је једна од најнеповољнијих неравномерности у Европи. Пошто се падавине и протицаји све више смањују у топлом делу године, тај ће се однос још више погоршавати. Велики проблем је што се због све мање снега и погоршавања режима падавина смањује интензитет обнављања подземних вода (очекује се и за преко 50%), па ће бројни водоводни системи који су се успешно снабдевали из подземних вода, доживљавати све веће проблеме и мораће да се повезују на регионалне системе са акумулацијама. Неорходне су акумулације са тзв. годишњим регулисањем, у којима се вода сакупља у водним периодима, да би се користила у све кризнијим маловодним периодима. То је једино могуће решење које се у свету користи више од пет миленијума.

Полазишта на којима се темеље решења у области вода. Најважније одреднице стратегије развоја водне инфраструктуре, оне које ће све више добијати на значајности у условима климатских промена, и које као такве имају трајно важење, су следеће.

- У планерском погледу Србија је јединствен водопривредни простор. Тај принцип има све већу сврсисходност у условима погоршавања водних режима због климатских промена, јер ће бити још неопходније да се ранији парцијални, просторно мањи водопривредни системи повезују у системе вишег реда, са превођењем воде из слива у слив – из воднијих планинских зона у маловодна подручја, али без негативних еколошких утицаја.

- Рационално коришћење, уређење и заштита вода решава се развојем интегралних вишенаменских система. Они су због рационализације коришћења вода, али и због економичности улагања разложени на две класе система:

- (а) 18 регионалних система за обезбеђивање воде за насеља и за оне технологије које захтевају највиши квалитет воде;

- (б) 11 речних система којима се остварују циљеви коришћења, уређења и заштите вода.

- У системима за снабдевање водом за пиће приоритет има коришћење локалних изворишта воде доброг квалитета. Принцип је да се само количине воде које недостају обезбеђују из регионалних система, која се ослањају на заштићена изворишта подземних и површинских вода републичког значаја. При избору решења приоритет имају подземне воде уколико испуњавају услове количине и квалитета.

- Локална и регионална изворишта воде за пиће морају бити стриктно заштићена у складу са регулативом, као и планским мерама предвиђеним пројектима.

- Подземне воде највишег квалитета могу се користити само за снабдевање насеља и оних индустрија које захтевају воду квалитета воде за пиће. Та изворишта подземне воде су из речних алувиона, из карстних издани, воде из основног водоносног слоја, итд.

- Квантитативна ограничења експлоатације водних ресурса су:

- а) из водотока: при захватању вода у водотоку се мора оставити проток који је једнак или већи од тзв. еколошког протока, који се одређује за сваку деоницу водотока према прописаној методологији. Акумулације за регулисање протока овде имају изузетно повољан ефекат у виду повећања малих вода наменским испуштањем вода.

- б) за подземне воде: експлоатација се врши тако да се не угрози добар квантитативни статус водних тела подземних вода.

- Због неповољних водних режима неопходне су акумулације за коришћење површинских вода. У овом Плану, као и у претходна два ППРС (1995. и 2010.) оквирно су дефинисане локације потенцијалних акумулација, како би се ти простори резервисали и заштитили за ту намену. Пошто тих простора нема довољно, посебно оних које омогућавају годишње регулисање протока, приоритет има заштита тих простора само за ту сврху.

- У равничарским реонима, у којима су најквалитетнији земљишни ресурси и у којима се морају користити транзитне воде, решења се заснивају на све сложенијим вишенаменским каналским системима. Највећи од тих система, ХЕ Дунав-Тиса-Дунав и ХС Северна Бачка имају приоритет у ревитализацији, завршавању и одржавању. Сви каналски системи добијају на значају у условима климатских промена, а њихова вишенаменска улога постаје још израженија. За ХС ДТД поред обнове потребно је да се повећа проточност – капацитет канала

и захватних грађевина, како би се створили услови за повећавање његове ефективности у периодима одбране од поплава и створили услови за развој мрежа канала нижег реда потребних за наводњавање.

- За индустријске потребе вода се захвата из водотока (осим за оне индустрије које се снабдевају водом из система водоснабдевања насеља) уз захтев да се поштују захтеви регулативе о спречавању и контроли загађења.

- Не дозвољава се изградња нових проточних система за хлађење ТЕ и других објеката, јер су термички капацитети чак и већих водотока већ искоришћени. То је посебно битно у условима климатских промена, са дугим и жарким летима, када је температура воде у водотоцима висока, па би чак и мало додатно загревање било веома опасно за водене екосистеме и могло би да доведе до кидања трофичких ланаца.

- Обезбеђеност испоруке воде је примерена захтевима корисника. Обезбеђеност снабдевања насеља је висока, не мања од 98% у регионалним системима и за технолошке захтеве базних индустрија и термоелектрана; у мањим водоводима треба да буде већа од 95%, док је 80% у системима за наводњавање. Обезбеђеност подразумева однос између дужине периода у којима су потпуно испуњени захтеви корисника у погледу количине воде која му је потребна, и укупног времена. У насељима, али и у технолошким системима, и у периодима рестрикције испоруке воде мора се обезбедити да испоручена количина воде не буде мање од 70% у односу на количину воде која је тражена (коефицијент редукције $\omega \geq 0,7$).

- Задатак акумулација је да изврше регулисање неравномерности протока и створе услове за коришћење воде, као и да побољшавају водне режиме - да смањују таласе великих вода и повећавају протоке у маловодним периодима. Морају се обезбедити прописани гарантовани (еколошки) протоци низводно од акумулација и водозахвата, у количини која треба да ствара услове за нормални развој водених екосистема, очување и обогаћивање биодиверзитета. Испуштање еколошких протока има приоритет при испорукама воде, тако да се може сматрати да је обезбеђеност тог протока приближно 100%. То је веома битно у условима погоршавања водних режима због климатских промена, јер се водени екосистеми могу сачувати само наменским управљањем акумулацијама и циљу побољшавања режима малих вода.

- Рационализација потрошње воде и виšekратно рециркулационо коришћење пречишћених вода је кључни стратешки захтев, који се остварује кроз водопривредне услове, сагласности и дозволе за коришћење вода.

- Искоришћење хидропотенцијала као еколошки најчистијег обновљивог извора енергије, има приоритет и обавља се у оквиру интегралних речних система. Савремена технологија опреме за хидроелектране омогућава да се рационално користе и потенцијали малих падова, те се такви системи планирају и на алувијалним рекама, искључиво у оквиру пројеката интегралног уређења,

заштите и коришћења тих долињских простора (пример: интегрални развојни пројекат долине Велике Мораве). Нису дозвољене МХЕ са дугачким цевоводним деривацијама којима се уништавају хидрографски и еколошки ресурси земље.

- Заштита од спољних вода (поплава) остварује се у оквиру 11 интегралних речних система (Јужна Морава, Западна Морава, Велика Морава, Колубара, Дрина са Лимом и Увцем, Тимок, токови Дунава и Саве, Банат, Бачка, Срем, Бели Дрим и Лепенац), применом три групе мера:

- (а) пасивном заштитом - линијским заштитним системима (насипи, регулације корита, уређење заштитних линија у градовима применом принципа тзв. 'урбане регулације');

- (б) активним мерама заштите: ублажавањем поплавних таласа у акумулацијама и ретензијама, као и активним управљањем каналским системима на северу земље, како би се радом устава и преусмеравањем течења активно утицало на смањење пикова таласа, пре свега спречавањем суперпозиција врхова таласа главних токова и притока;

- (в) применом неинвестиционих – организационих и планерских мера, којима се спречава раст потенцијалних штета од поплава, планским спречавањем градње скупих објеката у зонама које су угрожене поплавама.

- Заштита од унутрашњих вода (вода која доспева на површине које се бране: падавине, мали водотоци) спроводи се одговарајућим дренажним и каналским системима. У урбаним срединама планира се проширење система кишне канализације, уз увођење у праксу метода контроле количина и квалитета кишног отицаја (зелена инфраструктура: инфилтрација, задржавање – ретензирање, итд.) и смањења удела водонепропусних површина у насељима.

- Заштита вода од загађивања спроводи се интегралним управљањем водама, у оквиру тзв. речних система, на бази планских аката сектора вода. Примењују се принципи:

- а) принцип смањења загађења на месту настанка: смањење количина опасних материја на извору загађења (примена ресурсно штедљивијих технологија, рецикулација);

- б) комбинован приступ, који се остварује мерама контроле испуштања загађења (стандард емисије) и мерама контроле квалитета животне средине (стандард квалитета водопријемника), узимајући строжији критеријум од ова два;

- в) начело „загађивач плаћа”, којим се обавезују загађивачи да сnose трошкове мера за отклањање / смањење загађења;

- г) начело најбољих доступних техника, којим се обавезују сви субјекти, учесници у активностима везаним за воде, да примењују најбоље расположиве технике.

- Одржавање пловних путева на Дунаву, Сави и Тиси спроводи се у складу са више ратификованих међународних уговора. Обнова пловних канала у оквиру ХС ДТД одвијаће се у складу са пројектом обнове и реконструкције тог хидросистема. У случају реализације каскадног система ХЕ на Великој Морави, пројектом предвидети само места за изградњу бродских преводница, а њих треба градити само ако се за то нађу заинтересовани инвеститори. Нови мостови не треба да узимају у обзир ту чињеницу.

- Ставити под контролу нелегални и непланску експлоатација песка и шљунка. Експлоатација се може обављати искључиво према ревидованим пројектима, који треба да буду функционално усаглашени са пројектима регулација река, уз неопходно одобрење надлежних водопривредних организација и планско регулисање урбанистичким актом локалне самоуправе. Те активности треба да прати иста процедура пројектовања, ревизије и надзора која се користи и код регулација река.

- Сви водопривредни системи треба да буду оптимално уклопљени у еколошко и, социјално окружење. При планирању и коришћењу водопривредних система мора се водити рачуна о јединству процеса у природи чија је значајна компонента вода, из чега проистиче и повезаност и међузависност акватичних и приобалних екосистема. Мерама побољшавања водних режима треба стварати повољније услове за развој водених и приобалних екосистема и обогаћивање биодиверзитета. Једна од мера тог побољшања је тзв. 'оплемењавање малих вода', наменским испуштањем воде из акумулације, коришћењем тзв. селективних водозахвата којима се омогућава испуштање воде из пожељног температурног слоја у језеру и обогаћивање кисеоником извором типа затварача. Та количина је већа од оне која би била у природним условима.

- У вези цена воде и услуга у сектору вода важе следећи принципи:

1. Реални (економски) ниво цене воде одређује се на основу принципа пуне надокнаде трошкова и уз примену начела „корисник плаћа” и „загађивач плаћа”. Цена воде треба да обухвати и све трошкове заштите изворишта.

2. За коришћење водног добра и водних система који су добро од општег интереса плаћа се реална цена (принцип „корисник плаћа”).

3. Субјекти који узрокују загађење вода треба да сnose трошкове мера за отклањање или смањење тог загађења (принцип „загађивач плаћа”).

4. Реални (економски) ниво цене воде и услуга треба уводити постепено, у складу са економским и социјалним статусом корисника услуга.

- Мониторинг површинских и подземних вода треба интензивирати јер остварени ниво мониторинга није довољан за праћење статуса свих водних тела

и не обезбеђује довољно података за сагледавање трендова квалитета или за доношење одлука.

- При планирању, пројектовању и праћењу рада водопривредних система и објеката обезбедити учешће јавности у складу са принципима дефинисаним Архуском конвенцијом.

Најбитније одлике решења. ППРС је примерен реалности – скромним домаћим водним ресурсима и великој временској и просторној неравномерности падавина и протока. Решење се темељи на вишенаменским водопривредним системима складно уклопљеним у окружење, чији су примарни циљеви: подмиривање потреба за водом корисника, поуздана заштита од поплава, заштита квалитета вода и побољшање услова за развој екосистема и очување биодиверзитета. Такво решење има следеће битне одлике.

(а) развој водопривредне инфраструктуре је најважнија мера уређења простора, што је од посебне важности у условима погоршавања метеоролошких и хидролошких процеса; (б) недовољност домаћих вода захтева мере стриктне рационализације у свим гранама коришћења вода; (в) само се за снабдевање насеља вода користи једнократно: након захватању на извориштима подземних и/или површинских вода и након пречишћавања до нивоа квалитета воде за пиће, вода се упућује у водове насеља; (г) у технолошким процесима вода се користи вишекратно: пречишћене отпадне воде из насеља, као и пречишћене воде из индустрије се поново користе за технолошке процесе свуда где је то могуће; (д) због веома неравномерних водних режима, које одликују краткотрајни бујични поводњи, након којих наступају временски дуги периоди малих вода, када се укупни водни биланс домаћих вода спусти и на само око 10% од просечних годишњих протока, због чега становништво, привреда и екосистеми доживљавају тешке кризе – неопходне су акумулације са тзв. годишњим регулисањем протока. (ђ) у Војводини, Мачви, Посавини, које морају да користе транзитне воде међународних река, развијају се каналски системи који, такође, имају вишенаменски карактер (снабдевање водом привреде, одводњавање, наводњавање, заштита о поплава, пловидба).

Акумулације су неопходне, али су веома отежани услови за њихову реализацију. Постоје три разлога за то: (1) Због непланских урбанизација и запоседања речних долина, ниско лоцираних саобраћајница и привредних објеката, често у кориту за велику воду – веома су сужене могућности за релизацију акумулација; велики број тих објеката је изграђен после 1998. године, када је на снагу већ ступио први Просторни план Републике Србије, који је конкретно дефинисао локације свих неопходних локација које су резервисане за акумулације, што значи да су сви ти објекти нелегални. (2) Јавност Србије не зна реалну ситуацију у области вода и неопходност изградња

акумулација за уређење водних режима, а након велике грешке са форсирањем грађења МХЕ створен је одбојан став према грађењу било каквих објеката на рекама. (3) У Србији се у бројним наводно еколошким НВО још увек одржава давно превазиђена доктрина да се животне средина штити забраном грађења објеката на рекама (доктрина 'do nothing'). Због веома великих антропогених утицаја на животну средину сада је једина делотворна доктрина заштите водених екосистема: 'побољшавати водне режиме као неопходну меру да се обезбеде услови не само за опстанак, већ и за несметан развој водених екосистема'. А то се може једино остварити ако постоје акумулације, из којих се у критичним маловодним периодима испушта додатни протицај у оним количинама и са оним параметрима (температура, садржај кисоника у води) који су најповољнији са гледишта потреба ихтиофауне и осталих биоценоза у води. То се може постићи тзв. селективним водозахватима којима се вода испушта из температурног слоја у језеру који је пожељан за ихтиофауну, са наменским затварачима, који распрскавају млаз воде, обогаћујући је кисеоником у критичним периодима.

Велику улогу имају акумулације и у ублажавању поплавних таласа. У акумулацијама се предвиђају и посебно резервисани простори који су намењени управо тој важној мери активне заштите од поплава. Та мера је неопходна у условима повећавања великих вода.

Кључне поруке. Након овог излагања о правцима развоја сектора вода кључне поруке:

- Искуства из далеке прошлости (развој тзв. хидротехничких цивилизација) и скорашњих догађања показује да је развој хидротехничке инфраструктуре 'локомотива развоја' држава.
- Не спутавати водопривреду забранама и ограничењима да обављљ свој одговоран задатак.
- Просторним плановима и пратећим прописима морају се сачувати локације и простори који су неопходни за реализацију планиране хидротехничке инфраструктуре. Хидротехнички системи имају строго детерминисане локације које су неопходне за развој (изворишта, простори за акумулације), ако се оне униште парцијалним захватима – то је непоправиво.

РЕФЕРЕНЦЕ

1. Група аутора и институција под руководством Института за архитектуру и урбанизам Србије, Београд: Нацрт Просторног плана Републике Србије, пречишћен текст након јавне расправе, предат Влади Србије за увођење у процедуру усвајања (2023).
2. Ђорђевић В, Дашић Т, Плавић Ј. Uticaj klimatskih promena na vodoprivredu Srbije i mere koje treba preduzimati za zaštitu od negativnih uticaja; 52, Vodoprivreda (2020) pp. 39-68



Годишња конференција Научног друштва Србије
ГОДКОН 2024.
31. октобар – 1. новембар 2024. Београд

UTICAJ KLIMATSKIH PROMENA NA DOSTUPNOST IZVORA VODE ZA PIĆE U SVETU

Zoran Stevanović,
redovni profesor Rudarsko-geološkog fakulteta u penziji

APSTRAKT

Vode, posebno one kvalitetne za piće, ima sve manje u prirodi. Svet je suočen sa dve vrste pritisaka na vodne resurse: Na jednoj strani su klimatske promene, a na drugoj sve veće potrebe u vodi, u najvećoj meri generisane rastom svetskog stanovništva. Ova dva faktora rezultuju negativnom sinergijom i mnoge zemlje ili regioni se već suočavaju sa nedostatkom vode i značajnim iscrpljivanjem svojih rezervi vode (zemlje Arapskog poluostrva, severne Afrike, delovi SAD, Kine, Indije). Iako su klimatske promene neizbežni prirodni proces u geološkim vremenskim okvirima, njihovo intenziviranje pod uticajem čovekovih aktivnosti, uslovilo je rast pritiska na vodne resurse, uključujući sisteme izdani širom sveta. Ovakva situacija će se verovatno nastaviti, a prognoze su najnepovoljnije za aridni deo naše planete gde u velikoj meri utiču na kvalitet života i migratorne talase. Podzemne vode su osnovni resurs vode za piće za polovinu svetske populacije. Oko 70% eksploatisanih podzemnih voda se koristi za navodnjavanje, odnosno proizvodnju hrane, oko 20% za snabdevanje vodom za piće, a oko 10% za potrebe industrije. I pored globalno proklamovane potrebe za održivim korišćenjem vodnih resursa, humanitarno snabdevanje vodom ostaje nužnost u mnogim regionima sveta.

ABSTRACT

Impact of climate changes on availability of potable water sources at global scale

Shortage of potable water in the nature is a global trend and problem. The World is facing today the two major threats: Climate changes on one, and increased water demands, mostly generated by population growth, on the other side. These two factors provide a negative synergy, and many countries or regions are already facing water shortage and significant depletion of their water reserves (countries of Arabian Peninsula, Northern Africa, parts of USA, China, India). Although climate change is an inevitable natural process in geological time frames, its intensification under the influence of human activities has resulted in increased pressure on water resources including many aquifer systems distributed around the world. Such situation is likely to continue, and forecasts are even worst for the arid part of our planet, where we are witnessing deterioration of quality of life and migratory waves. Groundwater is the primary source of drinking water for half of the world's population. About 70% of exploited groundwater is used for irrigation, i.e. food production, about 20% for drinking water supply, and about 10% for industry needs. Despite the globally proclaimed need for sustainable use of water resources, humanitarian water supply remains a necessity in many regions of the world.

UVOD

Preko 70% površine Zemlje prekriveno je vodom pa bi našu planetu dakle pre trebalo nazivati „Okean“ nego „Zemlja“. Pri tome, samo 2.5% su „slatke“ vode, ostalo su slane ili zaslanjene. Lednici obuhvataju oko 70%, dok je samo oko 1% slatke vode u jezerima i rekama (UNESCO, 2015; UN Water, 2024). Preostali deo (blizu 30%) je nevidljivi resurs i čine ga podzemne vode, ali samo oko 40% tih voda učestvuje u aktivnoj vodozameni (Zektser & Everett, 2004). Oko 70% eksploatisanih podzemnih voda se koristi za navodnjavanje, odnosno proizvodnju hrane, oko 20% za snabdevanje vodom za piće, a oko 10% za potrebe industrije (Margat & Van der Gun, 2013; Van der Gun, 2022).

Prema podacima FAO (2017, 2024) svetska populacija je tokom 20. veka porasla 4,4 puta dok je u isto vreme korišćenje vodnih resursa poraslo 7.4 puta. Dostupnost malomineralizovanih, kvalitetnih voda za piće, ali i navodnjavanje radi proizvodnje hrane jedan je od najvećih izazova 21. veka. Danas oko 1,42 milijarde ljudi nema pristup bezbednom i adekvatnom snabdevanju pijaćom vodom od čega su oko 450 miliona deca (UN Water, 2024). Oko 2/3 stanovnika planete oseća ozbiljnu nestašicu vode tokom bar jednog meseca u godini. Oko 3 milijarde oseća nedostatak odgovarajućih sanitarnih objekata i centralizovanih sistema, a oko 800 miliona je hronično gladno. Voda je jedan od najvažnijih uzroka prevremene smrtnosti u svetu, i može biti jedna od glavnih prepreka za individualni i opšti društveni razvoj

(Stevanović, 2011). Najmanje 2 miliona dece umire svake godine zbog neispravne vode i neadekvatne higijene. U slabo razvijenim zemljama, čak 80 odsto zaraznih bolesti u vezi su sa vodom.

Skoro dve trećine svetske populacije je danas u „stresnim“ uslovima što se tiče vodosnabdevanja, a 10% živi u kritičnim uslovima (UN Water, 2024). Proizvodnja hrane, a sa njom i eksploatacija vode mora da konstantno raste kako bi se prehranili stanovnici naše planete, uvećani za oko dve milijarde tokom poslednjih 50 godina. Porast stanovništva najvećim delom odvija se u aridnim i oblastima siromašnim prirodnim resursima, kao i nerazvijenim zemljama. Uz ovo, i hronični nedostatak stručnjaka pogoršava probleme obezbeđivanja dovoljnih količina kvalitetne vode, a samim tim i uslova života, što nužno izaziva migratorna kretanja u pravcu teritorija sa povoljnijim klimatskim i prirodnim uslovima.

KLIMATSKE PROMENE, NJIHOV INTENZITET I UTICAJ

Kada se razmatra pitanje klimatskih promena, mora se uzeti u obzir interakcija između prirodnih procesa i efekta gasova staklene bašte za koje se očekuje da će uticati na klimatski i eko sistem naše planete u narednih 100-ak godina. Iako je Milankovićeva teorija cikličnosti klimatskih promena (1941) izvan okvira ovih analiza s obzirom na vremensku razmeru, ona je veoma doprinela da se poveća svest o značaju sistematskog praćenja klimatskih elemenata i predviđanja njihovog uticaja na stanovništvo i sa vodom povezane eko sisteme.

I pored rezervisanosti dela naučne i stručne javnosti, kao i spekulacija političara i nekih stručnjaka, danas su klimatske promene prouzrokovane ljudskom aktivnošću (CC) prepoznate, i u međunarodnoj javnosti se preduzimaju mere za ublažavanje njihovog intenziteta. U nizu izveštaja koje je objavio Međuvladin panel za klimatske promene (IPCC) zaključuje se da se klima naše planete značajno menja (IPCC, 2007, 2023). Globalna srednja temperatura vazduha pri površini tla u periodu 2011–2020. bila je za oko 1,1°C iznad one u periodu 1850–1900. sa većim porastom iznad kopna (1,59 °C) nego iznad okeana (IPCC, 2023). Globalna površinska temperatura porasla je od 1970. do danas brže nego u bilo kom drugom 50-godišnjem periodu tokom poslednjih 2000 godina. Zagrevanje je uzrokovano ljudskim faktorom, emisijom gasova staklene bašte pri čemu dominiraju CO₂ i metan (CH₄).

Među najvažnijim uticajima klimatskih promena na svetske rezerve sveže vode su oni izazvani povišenim temperaturama, promenjenim režimom padavina i promenama u hidrološkom ciklusu. Ove promene utiču i na aktivnosti korišćenja zemljišta, što opet donosi pritisak na vodne resurse. Još je četvrti izveštaj IPCC (2007) procenio globalni obrazac kontrastnih promena u padavinama koje se očekuju do kraja 21. veka: padavine u aridnim oblastima mogu se smanjiti i do 20%, u poređenju sa prosecima iz 1980-2000. Korišćenjem scenarija emisija gasova definisanih od strane IPCC i poređenjem rezultata modela sa onim iz referentnog

perioda 1961–1990. Döll and Flörke (2005) zaključili su da će se do sredine 21. veka prihranjivanje podzemnih voda u nekim trenutno poluaridnim zonama uključujući i Mediteranski basen, značajno smanjiti (od 30% do 70%). Inženjerska rešenja su neophodna da bi se obezbedilo održivo korišćenje voda i njihova zaštita od zagađivanja ili salinizacije (Stevanović, 2013).

RASPOLOŽIVOST VODNIH RESURSA I UČEŠĆE PODZEMNIH VODA

Resursi sveže („slatke“) vode na planeti su neravnomerno raspoređeni, baš kao i stanovništvo. Iako je oduvek težnja čoveka bila da se naseljava tamo gde su i vode, istorijski migratorni tokovi i kasniji razvoj civilizacija doveli su do toga da je uspostavljena globalna disproporcija između gustine naseljenosti i vodnih resursa.

U pogledu raspoloživosti vode po stanovniku, na prvom mestu je Amerika sa 24.000 m³/god, za njom je Evropa (9.000 m³/god), a zbog gustine populacije najsiromašnija je Azija sa 3.400 m³/god (FAO, 2017). Prema usvojenim okvirnim standardima UN, smatra se da su pod velikim stresom što se vodnih resursa tiče zemlje u kojima je stanovniku dostupno samo oko 1.000 m³/god. vode. Najbogatiji vodom, severni delovi hemisfere su retko naseljeni, a kao kontrast najveći natalitet beleži se u zemljama aridnih prostora Afrike i Azije. To dovodi i do sve težih uslova obezbeđivanja dovoljnih količina vode i pogoršanja sanitarnih uslova u potonjim predelima. Nadeksploatacija prirodnih rezervi vode (korišćenje većih količina vode od obnavljajućih) dovodi do opadanja kapaciteta izvorišta, spuštanja nivoa podzemnih voda, izrade sve dubljih bunara, prodora slanih voda u priobalnim područjima okeana i mora, kolapsa tla i drugih tehnogenih procesa (Burke & Moench, 2000; Stevanović 2011, 2018).

Korist od podzemnih voda za poljoprivrednike je da je voda proizvedena na samoj lokaciji, ili u neposrednoj blizini mesta upotrebe, može biti isporučena „na zahtev“ i „tačno na vreme“ (vegetacioni period). Ove okolnosti opredeljuju da čak 70-80 odsto poljoprivredne proizvodnje u Indiji danas zavisi od podzemnih voda. Tako je ostvaren rast broja bunara sa crpenjem vode sa manje od jedan milion u 1960. na oko 26-28 miliona u 2002. Svetska banka je u svom izveštaju utvrdila da 175 miliona Indijaca proizvodi svoje useve neodrživom upotrebom vode (Brown, 2012). U Pokrajini Pendžab u Pakistanu broj bunara opremljenih pumpama i „pobijenih“ (Norton) bunara porastao je sa nekoliko hiljada koliko ih je bilo 1960 godine, na skoro pola miliona. U Bangladešu broj dubokih i plitkih bunara povećan je sa 93,000 u 1982-1983 godini na skoro 800,000 u 1999-2000 godini (Burke & Moench, 2000).

Sve to dovodi do ogromnog pritiska na vodne resurse i nadeksploatacije, ali nije samo Indijski potkontinent izložen ovim pritiscima. Danas oko 18 zemalja u kojima živi polovina svetske populacije crpi previše vode iz svojih izdani (Brown, 2012). Među njima uz Indiju su i druga dva velika proizvođača žitarica – Kina i SAD – kao

i nekoliko drugih mnogoljudnih zemalja, uključujući Saudijsku Arabiju, Jemen, Irak, Siriju, Iran. U Severnoj kineskoj ravnici, prosečan pad nivoa podzemnih voda je 3 m/god, dok je u nekim područjima u blizini gradova dostigao intenzitet i od 6 m/god. Prema podacima Svetske banke na širem području glavnog grada Pekinga, bušenje sada mora biti pet puta dublje nego pre 20 godina. U ovom izveštaju su predviđene „katastrofalne posledice po buduće generacije“ ukoliko se ne nađu druge opcije i alternative (World Bank Group, 2016).

U želji za „vodnom i prehrambenom nezavisnošću“ nakon embarga na izvoz nafte 1973. godine, u Saudijskoj Arabiji je razvijena snažno subvencionisana poljoprivreda sa navodnjavanjem zasnovanim u velikoj meri na crpenju fosilnih rezervi vode iz vodonosnih slojeva (Brown, 2012). Danas, nakon skoro potpunog isušivanja dubokih izdani uvedene su korektivne mere uključujući desalinizaciju morske vode za veštačko prihranjivanje istih tih izdani. U severnom Iraku nužno korišćenje podzemnih voda za potrebe navodnjavanja, kao i za vodosnabdevanje urbanih područja koja se ubrzano razvijaju, izazvalo je regionalno sniženje nivoa podzemnih voda (Stevanović & Iurkiewicz, 2009). Jemen crpi oko 2 km³/godišnje podzemne vode, od čega se oko 90% koristi za navodnjavanje. I ovde je prisutno značajno smanjenje prirodnih rezervi vode i široko se primenjuje distribucija vode za piće cisternama (Burke & Moench, 2000). U Iranu, zemlji sa preko 90 miliona ljudi, proizvodnja žitarica između 2007. i 2012. godine, opala je za 10% jer su bunari za navodnjavanje počeli da presušuju. Jedna četvrtina žetve zasniva se na prekomernom crpenju podzemnih voda (Brown, 2012).

Crpenje vode drastično se povećalo tokom 20. veka i u SAD — više je nego udvostručeno od 1950. do 1975. Konikow u USGS izveštaju (2013) navodi da je crpenje vode iz izdani Visoke ravnice-Ogallala (Nebraska-Teksas i nekoliko drugih država), za potrebe navodnjavanja od 1940-ih dovelo do velikog pada nivoa podzemne vode (preko 50 m u pojedinim lokalitetima).

U nekim zemljama severne Afrike (Alžir, Tunis) ili Centralne i Južne Amerike (Meksiko, Argentina), takođe je došlo do velikog iscrpljivanja pojedinih vodonosnih slojeva, što je u priobalnim područjima praćeno prodorima morske vode. U nekim drugim ekonomski siromašnim zemljama kao što je severna Somalija, iscrpljivanje podzemnih voda je takođe evidentno, ali još uvek nerazvijene tehnike navodnjavanja i nedostatak finansijskih sredstava i opreme sprečavaju dalje smanjivanje rezervi voda u izdanima (Stevanović, 2018).

Burke & Moench (2000) navode da je od ukupno 23 megalopolisa, za koje je u 2000. godini procenjeno da imaju preko 10 miliona stanovnika, 12 veoma zavisno od podzemnih voda i sa izuzetkom Londona, svi se nalaze u zemljama u razvoju.⁶ I ostali megalopolisi, kao što je Los Anđeles, smatraju podzemne vode osnovnom

⁶ Meksiko siti, Teheran, Šangaj, Buenos Aires, Džakarta, Karači, Daka, Manila, Kairo, Bankok, London i Peking

komponentom u planovima budućeg vodosnabdevanja ili kao u slučaju Nju Delhija, imaju znatan deo populacije koja ne koristi komunalni vodovodni sistem i oslanja se na podzemne vode (često zagađene) kao primarni resurs.

Na jugu Evrope u Mediteranskom prostoru, situacija sa vodnim resursima je uglavnom pod kontrolom. Navodnjavanje je pretežno ograničeno na korišćenje površinskih voda, a potrošnja ne raste, što zbog stagnacije nataliteta, što zbog ekonomske cene vode (Dimkić et al. 2007; Stevanović, 2011). Međutim, neki projekti ukazuju na moguće buduće smanjeno prihranjivanje i smanjenje rezervi u budućnosti, u najugroženijim karstnim i aluvijalnim izdanima JI Evrope (Treidel et al. 2012; Stevanović, 2019).

Srbija se nalazi u okruženju zemalja koje su ili bogate vodom i sa intenzivnim vodnim bilansom (zapadni i JZ susedi bivše Jugoslavije), ili pod relativnim vodnim stresom (Severna Makedonija, Grčka). Tako svaki stanovnik Crne Gore ima na raspolaganju 21.395 m³ vode, ali koristi samo 1,18 % ove količine. U Bosni i Hercegovini stopa iskorišćenosti je još niža, ispod 1%. U Hrvatskoj i Albaniji koristi se manje od 5% vode koja je prosečno dostupna svakom stanovniku (FAO, 2017). Srbija se ne može smatrati niti bogatom, niti siromašnom vodom, parametri dostupnosti vode po stanovniku su nepovoljniji nego u navedenim primerima, ali daleko iznad stresnih. Tako smo na listi od 163 analiziranih zemalja u pogledu „vodnog stresa“ u 2023. bili na 96. mestu (Water population review, 2024). Ako se ostvare projekcije daljeg pada broja stanovnika Srbije koje na kraju 21. veka predviđaju manje ili oko 4 miliona stanovnika na našoj teritoriji, vode će biti više nego dovoljno (nažalost).

UTICAJ KLIME I ANOTROPOGENOG FAKTORA NA KVALITET VODE

Podzemne vode se u odnosu na površinske nalaze u prirodno povoljnijim uslovima zaštite pre svega zbog neizloženosti atmosferskim i klimatskim uticajima i manjem prisustvu živog sveta (bakterije, virusi) u podzemlju. Takođe, procesi prirodne filtracije u vodonosnoj sredini omogućuju samoprečišćavanje, naravno u određenoj meri i u zavisnosti od tipa i karaktera unetog zagađivača. To nije slučaj sa površinskim vodama u vodnim akumulacijama u kojima poseban problem predstavljaju eutrofni procesi.

Poplavni talasi koji su sve učestaliji u uslovima klimatskih promena, po pravilu rezultiraju degradacijom prirodnog kvaliteta vode, bilo da su u pitanju površinske ili sa njima u interakciji, podzemne vode. Spiranjem deponovanog otpada sa površine terena i izvan korita vodotokova ostvaruje se prenos zagađenja i iz najudaljenijih delova sliva.

Pored raznovrsnih zagađivača vodnih resursa (industrija, komunalne otpadne vode, poljoprivreda, saobraćaj i dr.) deo podzemnih voda se kontaminira prirodnim

kontaktem sa rudnim telima ili fosilnim podzemnim vodama koje nemaju mogućnost obnavljanja. To je tzv. geogenetska kontaminacija, a najčešći uzročnici su joni arsena, gvožđa, mangana, cinka, kao i fluoridi, jodidi ili radionuklidi. Smatra se da je u svetu skoro 10% svih bušenih i kopanih bunara izloženo nekom vidu geogenetske kontaminacije. U Bangladešu i Indiji su prisutna masovna oboljevanja i trovanja arsenom prisutnim u aluvijalnim izdanima Ganga i Bramaputre. I u Srbiji, kao i na širem prostoru Panonske nizije, postoje problemi korišćenja voda dubljih izdani sa povišenim koncentracijama arsena i organskih jedinjenja (pr. Banat, delovi Bačke) za koje i metode konvencionalnog prečišćavanja ponekad nisu dovoljne.

IMA LI REŠENJA ZA KRIZU VODE IZAZVANU KLIMATSKIM PROMENAMA?

Mnogi stručnjaci smatraju da je za globalni izazov vodnih ekstrema, poplava i suša, koji prate klimatske promene, izlaz u izgradnji brana i akumulacija. S jedne strane, one omogućuju zadržavanje poplavnih talasa, a sa druge omogućuju manipulaciju sa akumuliranim vodama i produženo snabdevanje vodom u kritičnim periodima suše. Uz to ide i mogućnost proizvodnje struje. Uz ove prednosti, postoje i tri problema: 1. projektovani vek akumulacija je oko 100 godina, pa i uz dvostruko produženje to je „zanemarljiv“ period ljudske istorije iza koga ostaje potpuno izmenjen prirodni ambijent i narušen eko sistem; 2. u aridnim oblastima iz akumulacija male i srednje veličine se često više vode gubi na isparavanje nego što se ispusti na nizvodnom profilu; 3. visoka cena izgradnje objekata, kao i tretmana vode ako se koristi za piće.

Mnogi projekti sprovedeni u poslednje dve decenije imali za cilj da predvide veličinu i efekte klimatskih promena na podzemne vode u različitim tipovima akvifera (Taniguchi & Holman 2010; Treidel et al. 2012; Stevanović, 2021). Dok numerički odgovor (podaci o isticanju izvora ili nivoima podzemnih voda) omogućuje procenu reakcije izdani na različite klimatske scenarije i veličinu prihranjivanja tokom vremena, nema previše projekata koji se direktno bave procenom ponašanja izdani i njihove unutrašnje ranjivosti ili otpornosti na promenljive klimatske elemente i padavine koje su dominantna komponenta obnavljanja iscrpenih (isteklih) količina vode.

Sistemi izdani imaju različite hidrauličke osobine; čak i kada imaju istu vrstu poroznosti, ne reaguju na isti način na prihranjivanje novom vodom, posebno kada je ono enormno (periodi poplava) ili potpuno odsustvuje (suše). Slično tome, dreniranje može biti veoma brzo, kada je izdan potpuno saturisana, ili sporo, kada izdan ima značajan kapacitet skladištenja nove vode (Stevanović et al. 2015). Na primer, plitki i tanki vodonosnici generalno su ranjiviji i prazne se mnogo brže od onih koji su veoma propusni i velike debljine. Aluvijalne izdani povezane sa manjim i privremenim vodotocima imaju veći deficit vode tokom sušnih perioda, u poređenju sa stabilnijim,

debelim aluvijonima u priobalju velikih reka. Karstne izdani velike vodopropusnosti mogu da akumuliraju značajne količine vode, i njihova reakcija na poplavne talase omogućava dužu retardaciju u izdani i izvesno prolongiranje isticanja, samim tim amortizovanje poplave.

Nedostatak podzemnih voda sve više se prepoznaje kao globalni problem, posebno pod predviđenim klimatskim promenama, bez obzira na scenarije. Koja su moguća rešenja za sprečavanje prekomerne eksploatacije tj. kontrolu korišćenja podzemnih voda, ali i istovremeno zadovoljavanje osnovnih ljudskih i ekoloških potreba? Odgovor leži u ova tri aspekta: održivo korišćenje, nadzor (kontrola) i mere inženjerske regulacije vodnog režima. Bušenje „humanitarnih“ bunara u aridnim oblastima mora se nastaviti, uz studije izvodljivosti i optimizaciju tehničkih rešenja. U suprotnom, pri nadeksploataciji može proći mnogo godina da se voda ponovo akumulira u izdanima do nivoa koji je održiv za buduće korišćenje.

REFERENCE

Brown L. 2012, Full Planet, Empty Plates: The new geopolitics of food scarcity. Earth Policy Institute, W.W. New York: Norton & Co.

Burke J.J., Moench H.M. 2000, Groundwater and society: Resources, tensions and opportunities. Spec ed. of DESA and ISET, UN public. ST/ESA/265, New York. p. 170

Dimkić M, Stevanović Z, Djurić D. 2007, Utilization, protection and status of groundwater in Serbia, Keynote paper, *Proceedings of IWA conf. Groundwater management in Danube River basin and other large basins*, Belgrade, pp. 83-102

Döll P, Flörke M. 2005. Global-scale estimation of diffuse groundwater recharge. *Frankfurt Hydrology Paper 03*, Institute of Physical Geography, Frankfurt Univ., Frankfurt am Main, pp. 1-21

FAO Aquastat. 2017, 2024, Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). <https://www.fao.org/aquastat/en/> Accessed on [2024/10/13].

IPCC, 2007, Climate change 2007: synthesis report—contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, Geneva

IPCC, 2023, AR 6 the Synthesis Report based on the content of the three Working Groups Assessment Reports, Switzerland, p. 42

Konikow L.F. 2013, Groundwater depletion in the United States (1900–2008): U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2013–5079, p. 63, <http://pubs.usgs.gov/sir/2013/5079>

Margat J., Van der Gun J. 2013, Groundwater around the world: A geographic synopsis. CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, p. 348

Milanković M. 1941, Kanon der Erdbestrahlung und seine Anwendung auf das Eiszeitenproblem (Canon of insolation and the Ice Age problem). Serbian Royal Academy, Belgrade

- Stevanović Z, Iurkiewicz A. 2009, Groundwater management in northern Iraq. *Hydrogeology Journal*, 17 (2): 367-378
- Stevanović Z. 2011, Menadžment podzemnih vodnih resursa, Univerzitet u Beogradu-Rudarsko-Geološki fak. Departman za hidrogeologiju, Beograd, p. 340
- Stevanović Z. 2013, Global trend and negative synergy: Climate changes and groundwater over-extraction, *Proceedings of the International Conference "Climate Change Impact on Water Resources"*, 17-18 Oct.2013, Belgrade: Institute of Wat. Manag. J.Cerni & WSDAC, pp. 42-45
- Stevanović Z, Ristić-Vakanjac V, Milanović S, Vasić Lj, Petrović B, Čokorilo Ilić M, 2015, Karstification depth and storativity as main factors of karst aquifer regimes: some examples from southern Alpine branches (SE Europe and Middle East). *Environ Earth Sci*, 74/1: 227-240
- Stevanović Z. 2018, Karst aquifers in the arid world of Africa and Middle East: Sustainability or humanity? in: *Karst Water Environment: Advances in Research, Management and Policy* (Eds. Younos T., Scheriber M., Kosič Ficco K.) The Handbook of Environ. Chem., vol. 68, Springer, Cham, pp. 1-43
- Stevanović Z. 2019, Karst waters in potable water supply: a global scale overview. *Environmental Earth Science*. 78: 662; <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8670-9>
- Stevanović Z. 2021, The impact of climate changes on groundwater. *Proceedings of the Jubilee Conference „Milutin Milanković: The Past 100 Years, and the Future“*, 17-18 November, 2020, Assoc. „Milutin Milanković“, Belgrade, pp. 157-176
- Taniguchi, M., Holman, I.P. (Eds.), 2010, Groundwater response to changing climate. *Selected Papers of the IAH*, vol. 16, Intern. Assoc. of Hydrogeol. CRC Press, Boca Raton
- Treidel, H., Martin-Bordes, J.L., Gurdak, J.J. (Eds.), 2012, Climate change effects on groundwater resources: A global synthesis of findings and recommendations, *Intern. Contrib. to Hydrogeol.*, vol. 27, Intern. Assoc. of Hydrogeol., CRC Press, Boca Raton, p. 414
- UNESCO, 2015, Water for a sustainable world. Facts and figures. UNESCO – World Water Assessment Programme. Perugia, p. 12
- UN Water, 2024, <http://www.unwater.org/water-facts/scarcity/> Accessed on [2024/10/15].
- Van der Gun J. 2022, Large aquifer systems around the world. The Groundwater Project, Guelph, Ontario, Canada, p. 113, <https://doi.org/10.21083/978-1-77470-020-4>
- World Bank Group, 2016, High and Dry: Climate Change, Water, and the Economy. World Bank, Washington, DC. © World Bank. License: CC BY 3.0 IGO. <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/23665> Accessed on [2024/10/09]

World population review, 2024, <https://worldpopulationreview.com/country-rankings/water-stress-by-country> Accessed on [2024/10/09]

Zektser S.I., Everett L.G. 2004, Groundwater resources of the world and their use. IHP-VI, Series on Groundwater, no. 6, Paris. p. 346



Годишња конференција Научног друштва Србије
ГОДКОН 2024.
31. октобар – 1. новембар 2024. Београд

ИНОВАТИВНОСТ У СРБИЈИ

Милосав Георгијевић⁷

Проф. др инж. у пензији, Универзитет у Новом Саду, Факултет
техничких наука,
Трг Доситеја Обрадовића 6, 21102 Нови Сад, е-адреса:
georgije@uns.ac.rs

АПСТРАКТ

Рад је интерпретација дугогодишњих презентација аутора студентима завршних година Факултета техничких наука Универзитета у Новом Саду којима је предавао, а са циљем подстцаја иновативног размишљања будућих инжењера. Ужа научна област аутора је: техника, машинство, транспортна техника, која се временом трансформисала у токове материјала и логистику, тако да рад није проистекао из менаџерских размишљања, већ из системских размишљања о иновативности током припреме патентних пријава (прва пријава 1984. године) и анализа иновативности у Немачкој, где је током рада на Универзитету у Новом Саду (од 1977 – 2014.) провео око 3.5 године, на сродним катердрама које су водеће у свету и са којима је имао трајну сарадњу. Пре читања овог писанија, корисно је прочитати литерарне изворе, бар под бр.: 3, 6 и 7, који дају књишку анаизу иновативности и преглед стања иновативности у Србији, док рад даје критичку анализу стања иновативности у Србији и образлаже зашто „иновативност не станује у Србији“ и поред мера које су предузете од 2000. године па на даље. Све што се предузима (видети у

⁷ Члан: ASIM (Arbeitsgemeinschaft Simulation), био је члан: VDI (Verein Deutscher Ingenieure), BVL (Bundesvereinigung Logistik). Оснивач је (1992. године) Друштва пријатељства Југославија –Јапан при Универзитету у Новом Саду, а 2001. године био је саоснивач и вишегодишњи председник Клуба немачких стипендиста при Универзитету у Новом Саду (A. von Humboldt i DAAD), води више комисија за стандарде.

литератури), а што се може поздравити, само су потребни али недовољни предуслови, тако да се може констатовати да је иновативност отворила врата у Србији, јер аутори текстова о иновативности углавном немају сопствена искуства, већ се базирају на садржајима светских ауторитета, почев од Шумпетера (Joseph A. Schumpeter, 1883-1950.) па на даље, који су анализе и препоруке базирали на развијеној привреди и правно уређеној држави.

УВОД

Подношење патентних пријава (прва пријава 1984. године), чести боравци и партнерски односи са катердама на универзитетима у Немачкој (Дармштадт, Минхен, Дортмунд, Дрезден, ..), где је током рада на Универзитету у Новом Саду (од 1977 – 2014.) провео око 3.5 године, подстакли су аутора овог писанија на ширу и системску анализу појма иновативности у привреди, јер се тиме превасходно баве економисти, а нарочито менаџери, који често, само са емпиријским искуствима помешаним са политиком кроје правила економијама света.

Аутор је инжењерске професије из области: техника, машинство, транспорта техника, која се временом (после 1990. године) трансформисала у токове материјала и логистику

и добила широк системски приступ захваљујући развоју рачунарске технике (хардверу и софтверима). Пошто је овај рад интерпретација презентација аутора студентима завршних година (којима је предавао) на Универзитету у Новом Саду, Факултету техничких наука [1], а са циљем подстицаја иновативног размишљања будућих инжењера – пројектаната и конструктора, подсетимо се неких мудрости, које нас уводе у свет иновативности:

- *За нову истину, нема ничег тежег од старе заблуде (Ј. В. Гете),*
- *Природу је могуће победити само покоривајући се њој (Ч. Дарвин),*
- *Ко зна више, више и сумња (Зенон),*
- *Отвори очи не жмури! Ако не жмуриш видећеш.*
Ако видиш, запамтићеш. Ако запамтиш, схватићеш.
Ако схватиш, размишљаћеш. Ако размишљаш, критиковаћеш.
Ако не критикујеш, онда још жмуриш (М.Ј.Вишњић),
- *Живот вам је коа кошуља. Ако прво дугме не закопчате како треба, ништа неће ваљати (Си Бинпинг).*

Развој било ког привредног субјекта или друштва мора почивати на иновативности, као свеколиког свакодневног деловања на промени околине, а проналазаштво се може сматрати као врхунац иновативности.

Шумпетер (Joseph A. Schumpeter, 1883-1950.), који је још између два светска рата писао књиге из економије [2], дефинисао је да су иновације:

- сви нови производи,
- све нове методе,
- сва нова техничка решења.

Дакле сва истраживања и квази истраживања у природно-техничким дисциплинама, али и:

- организационе мере са социјалиним компонентама које дотичу учеснике.

Ако се истражују још старије дефиниције, доћи ће се до: Radtenbacher-a (*Principien der Mechanik und des Maschinenbaus*, Bassermann, Mannheim, 1852), који пише: *Проналазак и начињено у техници не почива просто на науци и ручном раду, већ управо и умном раду, који се као уметност мора назвати.*

После II светског рата ова дефиниција се сужава и после 1970. године су иновације само техничке природе. Пред крај 20 века, враћају се виђења ка Шумпетеру и иновације добијају системски прилаз и виђења новости и напретка. Иновације су више од научно- истраживачког рада и његових резултата, јер подразумевају практичну примену која решава привредне и друштвене проблеме, па стога тражи широк круг учесника.

Садашње дефиниције иновација зависе од тачке посматрања (аутора). Нпр. економисти дају да је иновативност претварање креативне идеје у производ, услугу или процес који се могу комерцијализовати [3], а креативност дефинишу као способност за обраду информација на начин да се дође до нечег новог, оригиналног и значајног. Они дају предност креативности (креативно = ново, корисно, изводљиво), јер сматрају да креативност представља основу иновативности. Једна од дефиниција каже да иновације обухватају све активности у процесу настајања идеја, развоју производа, технологији производње и маркетингу новог или значајно унапређеног производа или процеса. ЕУ наводи да се суштина свих развојних промена, по правилу огледа у иновативности. То је свеприсутно у целокупном подручју људске активности, да иновативност постаје уводна тачка при анализи комплексности нове економије, друштва и културе у настајању, укључујући и индивидуалну инвенцију, па коначни резултат зависи од сложености интеракције [4]. У закону о иновативној делатности Србије (члан 2) пише: *иновација јесте примена новог или значајно побољшаног производа, процеса или услуге са циљем*

стварања нове додатне вредности, и као таква може бити иновација производа, иновација процеса иновација организације или маркетиншка иновација [4].

КАКО ПОЧЕТИ?

Ако имамо и на интернету доступних књига, писаних радова или

презентација о иновативноисти, а Србија чак има и закон о иновативној делатности, зашто онда нисмо иновативнији, где су патентне пријаве, индустрија са конкурентним производима „*Made in Serbia*“ и/или још битније да је неки наш производ осмишљен – пројектован/конструисан у Србији („*Create in Serbia*“)? Да ли се одлуком Владе или доношењем закона може постати иновативан? Где је почетек иновативног процеса?

Ко нешто ради и тражи идеје да сутра боље то ради, а има прпоблем одакле да почне, нека прочита још једном Робинсон Крусо (прво објављивање 1719. год.)!

Са економске тачке гледања, око нас је привредна сцена и тржиште свега и ако се питамо одакле почети или ко треба да подстакне развој и настанак идеја, имамо две опције:

Technology – Push или Market –Pull

У свакодневном раду најчешће је то комплексна варијанта ова фактора.

Ако се дође до идеје шта би могло да нас учини бољим и конкурентијим, следи анализа прихватљивости иновација са економског аспекта и нужно уклапање у трошкове које свеколико тржиште прихвата.

Озбиљни прилази иновативности подразумевају комплексна истраживања од основих до примењених, уз стални обзир према наручиоцу или потенцијалном кориснику иновације уз прихватљиве економске параметре, што захтева сарадњу политике, економије и друштва.

Иновативност тражи слободу и подстицање духа, дакле слободна друштва (државе са грађанским слободама), која респектују креативност и оне који више знају и даље виде, а спремни су да се одрекну слободног времена ради идеје и унапређења нечега, уз награду која ће бити подстицај – мотивација за даља усавршавања, истраживања и иновације. Мотив предавања аутора студентима је био да сваки инжењер када види неку машину – уређај или процес, постави себи питање: да ли ово може бити боље?

Без техничких идеја и иновација, друштво би било сиромашније, а улагања у истраживање и развој су показатељ бриге друштва за будућност!

Поред свакодневног иновативног деловања свих нас на сваком послу, које се у Јапану зове **кајзен** (改善, значи „унапређење“ или „промену набоље), комплексна истраживања сагласна стратергијама развоја, усмеравају се или преко универзитета или преко развојних института, који су независни или поред великих компанија.

Ако се питамо на коме почивају значајније иновације у друштву и привреди, следи одговор:

- на младим истраживачима на универзитетима (до око 30 година) и институтима,
- на развојним бироима у предузећима,

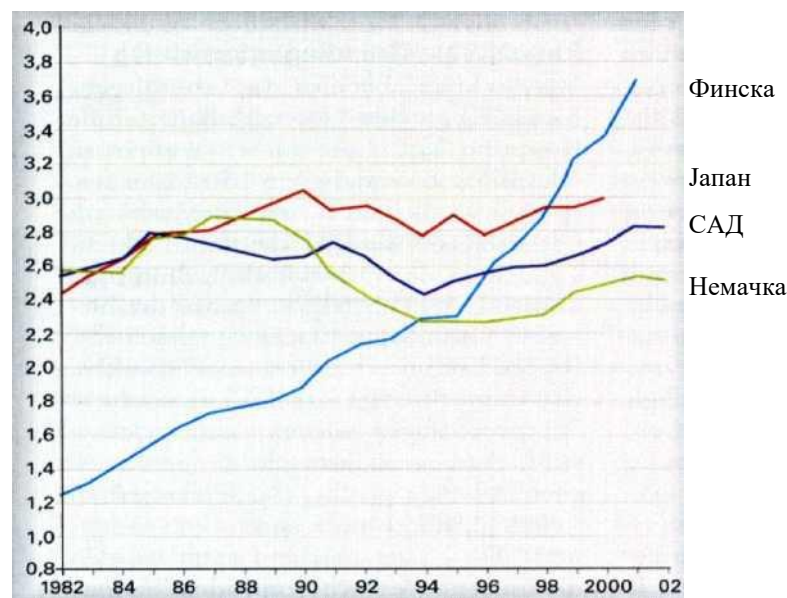
Како доћи до идеје или како се добијају инспирације за креативност? Одговор је прост: најпре или вероватно најбрже кроз комуникације (свих врста), где се подразумева директна (људска) комуникација унутар и изван своје средине, пословна преко пословних патрнера, скупова, сајмова, преко свемогућег интернета, али и читањем нпр. Достојевског (пример Анштајна) или шетањем пољима или поред Дунава!

Да би друштво и/или предузеће постало иновативно, треба створити климу, да се ткзв. **случаји** помешају са интуицијом и срећним околностима!

Иновативна друштва (државе) својим стратегијама развоја стварају претпоставке, преко издвајања за истраживања и развој.

Ако нам Финска по много чему може бити узор, небројано пута сам показивао већ застарели дијаграм са слике 1, који указује где су били нпр. 1980. године када су донете

одлуке о измени парадигме државе и повећања издвајања за истраживања и развој (из БНД) са око 1%, а која су пре 2000. године већ прешла 3%, дакле веше од САД, Јапана и Немачке! Резултате не треба коментарисати, јер су видљиви.



Слика 1. Издвајање за истраживање и развој из БНД [1]

За озбиљније анализе параметара иновативности у привреди (и друштвеној заједници) које треба вредновати и мењати, даје се пример Немачког друштва инжењера VDI (*Verein Deutscher Ingenieure*), који при томе узимају у обзир:

- број апсолвената технике,

- **издвајања за образовање,**
- **издвајања за истраживања и развој (И&Р),**
- **привреда која почива на науци,**
прихватање и примена резултата истраживања,
- **број патентних пријава,**
- **трговина високим технологијама,**
- **продуктивност у привреди,**
- **издвајања за стицање нових информација,**
- **број и стање у стручним школама [9].**

Да би Немачка привреда остала иновативна, предузећа траже повећање инжењерског кадра и до 10% годишње, а од тога око половина треба да ради на И&Р.

Ако је креативност основа иновација, а креативност је уметничка категорија индивидуе, и то раде инвентивни – широко образовани, током дискусија о реформама високог образовања у Немачкој, министарка овог ресора питала је јавност: зашто инжењери не би учили и мало филозофије?

У иновативним друштвима велике компаније објављују колико десетина иновација настаје на дневном нивоу, или нпр. за редизајнирање неког типа аутомобила, колико је пријављено патентних пријава (нпр.: током редизајнирања новог Мерцедеса високе класе настало је око 1000 пат. пријава, а то значи вишеструко иновација) итд.

Пошто о иновацијама не постоје статистички подаци, даје се стање патентних пријава ради сагледавања иновативних процеса у свету и код нас. Подаци патентних институција за 2022. годину показују да је Кина 2021. године примила највећи број патентних пријава и то: 1.59 милиона од 3.4 милиона које су поднете широм света, а да је пораст броја патентних пријава био 4.2% [10].

Европски патентни биро у истој години добио је 188 600 патентних пријава, уз повећање од 4.5% [11]. За Србију према подацима Завода за интелектуалну својину, број патентних пријава исте године је био 148 [12].

Ова цифра из годишњег извештаја тешко је видљива на интернет страници Завода, као да скривамо срамоту, уместо да се питамо где смо? Узречица аутора већ дуже време је: *ту смо где смо и нисмо случајно ту где смо!*

ИНОВАТИВНОСТ У СРБИЈИ

Пошто циљ рада није енциклопедијског карактера нити монографски, анализа стања иновативности у Србији посматра се од времена самоуправљања, када је аутор почео да ради (после студија машинства) у индустрији, премда је време после II светског рата имало иновација светског значаја (нпр.: *Београдска шака*). Тада је, после 1970. године у фабрикама

владала директива (вероватно КПЈ) да се радничка класа подстакне на иновативност, што се свакако мора поздравити. Сваког месеца одржавали су се зборови радника и јавно саопштавани предлози за иновације. Нажалост ово није дуго потрајало, јер се изгубио интерес радничке класе за иновативност. Добра идеја није дала очекивани помак за унапређење друштва, јер је имала недоречености, као нпр.:

- принципијелно се очекивало од свих запослених да учествују у подизању свести ка иновативности ради напретка самоуправног друштва, али у пракси се то углавном свело на радничку класу. За КАЈЗЕН тада у Југославији вероватно мало ко је и нешто знао, а он почива на свакодневним малим иновацијама свих запослених!
- вероватно је највећи проблем био оцењивање користи или добити од иновације и нарочито награђивање иноватора, јер је друштво почивало на једнакости, а већ тада је почело значајније раслојавање. Иноватори који су награђивани плакетама или ситним новчаним наградама, брзо су се уморили.

Време пре 1990. године у многим предузећима намножило је велик број подобних другова који су се ангажовали око разних „соц. савез“ институција у предузећу или у граду, али су били на платном списку и баласт за оне који треба радом да одрже предузеће и омогуће његов напредак у окружењу (Европи) у коме Исток све више тоне, а Запад улази у кризу.

Период од 1991. до 2000. године донео је урушавање свих вредности самоуправног социјализма, али и свих људских вредности и промовисао грабеж и крађу као закономерну појаву, па стога о иновативности нема смисла писати.

После 2000. године, било је више покушаја у Србији да се поврате иновативна размишљања, као на пример:

- први истраживачки пројекти Министарста науке, требали су да имају међународне рецензије. Ова добра и нужна идеја требала је да елиминише квази истарживачке пројекте, али се појавио проблем шта ћемо са „нашима“ који су мислили да треба да добију истраживачке пројекте, без обзира да ли имају икакву вредност.

Највећа брука је што су се истраживачки пројекти из 2011. године развлачени до после 2020. године,

- током марта 2007. године имали смо позитиван тренд и јавну расправу у ИВ Војводине око документа „Основни правци технолошког развоја АП Војводине“, који је имао позитивне намере, али нажалост није озбиљно заживео,

- Влада В. Коштунице донела је 2005. године Националну стратегију привредног развоју Србије, који је био више жељовник него изводљив план,

- после 2008. министар науке (Б. Ђелић) је прозивао научну заједницу и питао за резултате, јер смо имали истраживачке пројекте скоро без патентних пријава,
- од 2005. године донето је више законских докумената из домена заштите интелектуалне својине, расписују се конкурси за иновативне пројекте, итд,

што је потребно, али не и довољно за свакодневност иновативног друштва.

Последњих година постоје покушаји да се промовише интелектуална својина, где је свакако и иновативност, о чему се може наћи на свемогућем интернету више књига, радова и брошура, што је корисно и позитивно, али ми нисмо постали иновативно друштво и то скоро нећемо бити! Највећи број наслова који пишу о иновативности су књишког карактера са лепим анализама и подацима шта се у свету сматра потребно и довољно да би друштво било иновативно, без анализе шта је тамо другачије у односу на Србију и које предуслове ми не испуњавамо, да би то све било применљиво и код нас.

У ЧЕМУ ЈЕ ПРОБЛЕМ?

Пажљивим читањем овог писанија, а и литературе, намеће се неопорив закључак да није изграђена друштвена клима потребна за иновативно окружење, која ће промовисати ред и рад, у којој ће се тражити знање и умеће и награђивати они који знају и спремни су да се за идеју и више циљеве одрекну слободног времена тражећи решење за задатке који су иновативни и који мењају свакодневну стварност и унапређују друштво или предузеће. Ако мислимо да су за наше проблеме други криви, проучимо искуства Финске, која нам може бити узор. Не сме се заборавити да после 2000. године нисмо имали лустрацију, али смо имали лоповску приватизацију и да су нови власници предузећа недорасли за озбиљно привређивање које има развојну функцију! Држава Србија нема јасну стратегију привредног развоја и одреднице шта би требало да буде „*Made in Serbia*“ а нарочито „*Create in Serbia*“. Од страних инвеститора не можемо очекивати да их значајније занима социјална функција предузећа у Србији.

УМЕСТО ЗАКЉУЧКА

Промене у регулативи без промена у главама, неће дати резултата. У држави која не функционише транспарентно, где се дипломе доводе под знак питања, где је најважнија партијска припадност и послушност, не станује иновативност, без обзира на отварање врата иновативности са законском регулативом и подстицајним пројектима.

Литература

1. Георгијевић М., Иновативност и проналазаштво као мотори развоја и промена, презентација предавања, Универзитет у Новом Саду, Факултет техничких наука, Нови Сад, 2003-2017,
2. Schumpeter J., The Theory of Economic Development, Transaction Publishers, New Brunswick and London, 2004,
3. Пауновић Б., Креативност и иновације, Економски факултет, Београд, 2014, <https://www.ekof.bg.ac.rs>,
4. -, The European Community's Development Policy – Statment by the Council and Commision, Internet, 10/07/2005, <http://www.europa.eu.int>,
5. Закон о иновативној делатности, Сл. Гласник РС, бр. 129/2021-3, Београд, 2021.
6. Зљајић Љ., Иновативност – незаобилазан чинилац развоја, <http://www.bos.rs/cepit/evolucija/html/13/inovativnost.htm>,
7. -, Analiza stanja inovacija i procesa digitalne transformacije u Republici Srbiji, STARTECH, NALED, Beograd, 2022.
8. Лазовић С, Петровић М. В, Николић Д, Војновић Илић Љ, Богојевић А, Белић А, Демшар Ф, Наука и иновације у Србији, Академска мисао, Београд, 2024.
9. -, Innovation in Deutschland, Spektrum der Wissenschaft, *VDI nachrichten*, VDI-Verlag, Düsseldorf, 2003.
10. <https://serbian.cri.cn/2022/11/22/ARTIV9wxBNK7UpXkeCmVNgul221122.shtml>
11. <https://www.zis.gov.rs/vesti/2022-epo-patent-index-2021/>
12. <https://www.zis.gov.rs/o-zavodu/dokumenta/godisnji-izvestaj-o-radu/>.



Годишња конференција Научног друштва Србије
ГОДКОН 2024.
31. октобар – 1. новембар 2024. Београд

ЕМИСИЈЕ ГАСОВА СА ЕФЕКТОМ СТАКЛЕНЕ БАШТЕ И БУДУЋНОСТ ДОМАЋЕ ЕНЕРГЕТИКЕ

Александар Јововић
Универзитет у Београду, Машински факултет

АПСТРАКТ

Енергетска транзиција укључује три стуба: енергетску ефикасност, производњу обновљиве енергије и масовну електрификацију сектора крајње употребе. У циљу испуњења циља о максималном порасту средње температуре на земљи од 1,5°C у односу на пред-индустријски период, неопходно је да обновљиви извори енергије чине 90% енергетског микса до 2050. године. Такве промене би резултирале утростручењем потражње за електричном енергијом у наредне три деценије, што би довело до мноштва изазова. Иако је енергетска транзиција неопходна за постизање глобалних климатских циљева на отпоран и правичан начин, расте забринутост због доступности и приступачности минерала и метала потребних за њу. Република Србија, као део европске породице народа, и кандидат за ЕУ, опредељена је ка циљевима енергетске транзиције. У раду су приказани стратешки прваци енергетског развоја у наредном периоду и последице на емисије гасова са ефектом стаклене баште.

УВОД

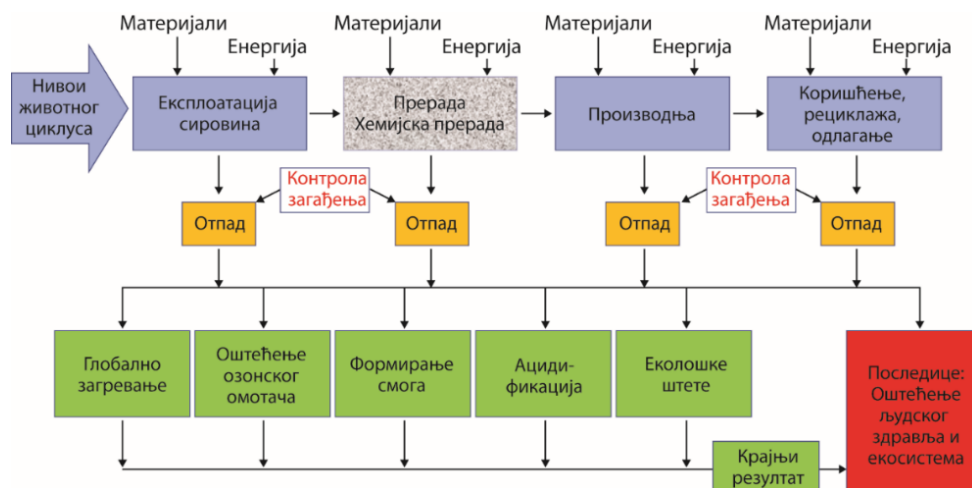
Убрзање климатских промена определило је свет ка угљеничној неутралности. Европа се залаже за драстичне промене у сектору енергетике, уз постепено нестајање фосилних горива, убрзани развој и увођење обновљивих извора енергије (ОИЕ) и водоника, виши ниво енергетске ефикасности, још неизвесну судбину нуклеарне енергије, али и масовну електрификацију сектора крајње потрошње. Остваривање циља декарбонизације захтева да обновљиви извори енергије чине 90% енергетског микса до 2050. године, што значи 10 пута већи инсталирани капацитет у односу на данашњи, при чему ће 80 % свих друмских возила бити електрична [1].

Кључне технологије као што су соларни панели, ветротурбине и батерије захтевају критичне материјале/сировине као што су никл, бакар, литијум и елементе ретких земаља. Стварање сигурних и отпорних ланаца снабдевања сировинама од кључне је важности, уз заштиту животне средине побољшањем циркуларности и одрживости критичних сировина. Светски познати произвођачи возила и ауто делова (ОЕМ), као крајњи корисници сировина, постављају све више стандарде у одрживој експлоатацији и заштити животне средине, те ова питања нису више ствар само прописа, већ и многих организација као што је Иницијатива за обезбеђивање одрживог рударства (ИРМА).

У таквом свету данас живи и ради и Србија, значајно погођена климатским променама, али и у прилици да постане саставни део ланца производње најзначајнијих производа садашњице и ближе и даље будућности. Такође, у том временском тренутку Србија је израдила и неколико важних стратешких докумената у циљу успешне енергетске транзиције и лакшег превазилажења проблема климатских промена.

Климатске промене као окидач проблема - стање ствари

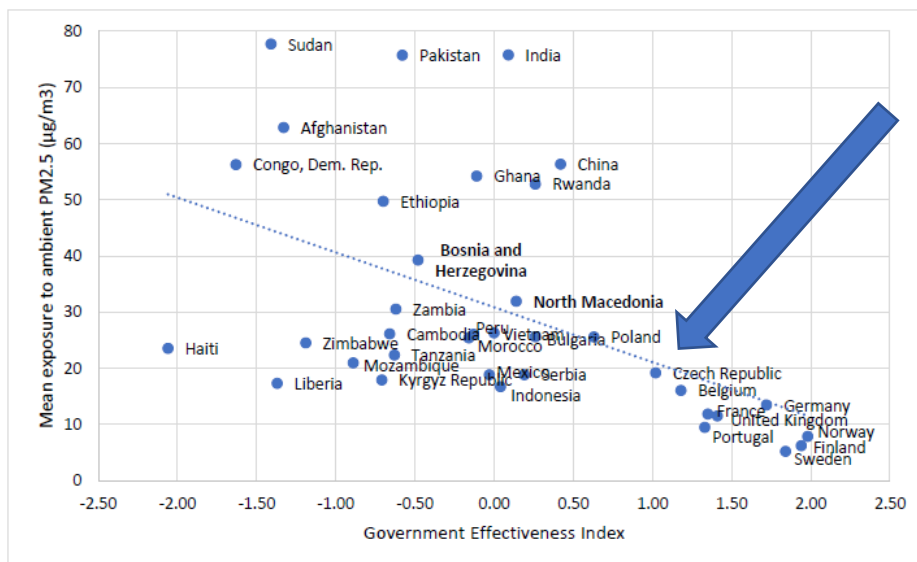
Када се анализирају енергетски извори и постројења, јасно је да сви имају неки утицај на животну средину, мада је трансформација и финална потрошња значајнија по том утицају од производње примарне енергије (слика 1).



Слика 1. Шема утицаја фаза енергетског животног циклуса на животну средину [2]

Сви, на слици, приказани феномени и утицаји, данас су углавном пали у сенку кључног, глобалног феномена, климатских промена, и његових последица по нашу будућност. На основу анализе 100.000 научних радова објављених између 1951. и 2018. недвосмислено је показан и документован утицај климатских промена на екосистем наше планете, као и да је неповољним трендовима захваћено око 80% површине на којој живи око 85% становника Земље. Пропуст да се смањи емисија ГХГ до 2030. године, проузроковаће негативне последице које ће постати јасно видљиве већ после 2040. године: око 4 милијарде људи биће изложено топлотним ударима различите дужине трајања, а око 400 милиона људи биће изложено температурама изнад прага издржљивости за рад. Услед претерано високих температура додатно ће умирати око 10 милиона људи годишње. Процењује се да ће пораст броја становника условити да се до 2050. године потребе за храном повећају за око 50% годишње, али због високих температура и померања вегетационе линије ка паралелама ближим половима, раст у производњи хране ће достигати тек око 32% годишњих потреба. Житарице и пиринач доприносе са око 37% енергије/калорија које је неопходно унети у људски организам, али због глобалног отопљавања, род ових култура ће се смањити за око 35%. Од 2040. године, око 700 милиона људи у свим крајевима наше планете биће изложено сушама које ће трајати и преко 6 месеци годишње, а подизање нивоа мора биће једна од најдраматичнијих последица за више од 600 милиона људи који живе у ниском приобаљу [3, 4].

На жалост, овај феномен и његови утицаји не заобилазе ни наш регион, често називан Западни Балкан. Привредни развој земаља у овом региону у дугом претходном периоду био је заснован на коришћењу фосилних горива, углавном угљева лошијег квалитета. Тај, тзв. мрки индустријски развој, назван по називу врсти коришћеног угља, онемогућио је успостављање одговорних правила пословања, квалитет институција, другим именом управљање, а у неким земљама и владавину права. Индикатори квалитета животне средине су у корелацији са индикаторима управљања, као што су ефикасност управљања државом, право гласа и одговорност, политичка стабилност, регулаторни квалитет, владавина права и контрола корупције (слика 2.). Неодговарајуће управљање државом у било ком сегменту, а данас посебно у сегменту климатских промена доводи до значајних економских последица. Директни утицај на смањење БДП Републике Србије као последица промене климе, а без примене мера адаптације у односу на стање које би било без промене климе приказано је у табели 1 (милијарди USD).



Слика 2. Вредности концентрације РМ 2,5 у зависности од индекса ефикасности управљања државом [5]

Табела 1. Смањење укупног БДП-а у односу на онај у условима без промена климе (и обухвата све делатности које су погођене порастом температуре) изражен у милијардама УСД и % [6]

Пораст Т за:	2020-2040	2040-2100	2020-2100
1°C	15.5 (1.20%)	328.9 (4.74%)	344.4 (4.19%)
2°C	58.1 (4.53%)	708.2 (10.20%)	766.3 (9.32%)
3°C	59.1 (4.97%)	831.3 (12.88%)	890.4 (11.65%)
4°C	97.5 (6.87%)	1,904.9 (18.46%)	2,002.4 (17.06%)

Како би се колико је год то могуће избегле наведене штете, Република Србија је прихватила пут енергетске транзиције. Потписани су и ратификовани, уз раније конвенције и протоколе УНФЦЦЦ, и Споразум из Париза и Софијска декларација о Зеленој агенди за Западни Балкан, чиме се Србија обавезала да, заједно са ЕУ, ради на угљеничној неутралности европског континента до 2050. године [7]. Такође, чланство у Енергетској заједници и споразум са ЕУ о стабилизацији и придруживању само додатно јачају овај циљ [8, 9]. Сви домаћи прописи, произашли из наведених споразума, директно или индиректно утичу на на сектор енергетике, као и сарадња са Организацијом за економску сарадњу и развој (енгл. Organization for Economic Co-operation and Development), Међународном агенцијом за енергију (енгл. International Energy

Agency), Светском трговинском организацијом (енгл. The World Trade Organization) и сл.

Досадашњи, променљиво успешан рад, на смањењу утицаја климатских промена приказан је у извештајима према Оквирној конвенцији УН о промени климе (први, други и трећи извештај, тзв. НЦ, као и први и други двогодишњи ажурирани извештај, тзв. БУР.) Србија је предала и први БТР у складу са обавезама Париског споразума, као и Намеравање национално утврђене доприносе (енгл. *Intended National Determined Contributions - INDC*), и ревидиране циљеве (енгл. *Nationally Determined Contribution-NDC*), са циљем смањења емисије GHG од 33,3% до 2030. године односу на 1990. годину, односно 40,3% укључујући и сектор LULUCF, што ће се потврдити и кроз Стратегију нискоугљеничног развоја усвојену 2023. године (рађену више од 6 година) [10-16]. У складу са њом, до 2030. године, РС има за циљ да оствари смањење емисија гасова са ефектом стаклене баште од 33,3% у односу на нивое из 1990. године, уз учешће ОИЕ од 36% у свом енергетском миксу и побољшање енергетске ефикасности од 32,5%. Поређено је више сценарија развоја и смањења емисија ГХГ, при чему амбициознији циљеви захтевају знатно више напора, за шта у овом моменту нема довољно воље, мада би РС могли одвести значајно напред у технолошком и економском смеру. Стратегија заштите животне средине РС за период од 2024. до 2033. године - Зелена агенда за Србију, је **фази завршних консултација и усвајања** Усвојен је и Интегрисани национални енергетски и климатски план [17], који представља кључни стратешки документ који у погледу обновљивих извора енергије, енергетске ефикасности и смањења емисија GHG дефинише циљеве за 2030. годину и предвиђа конкретне мере и политике за њихово достизање, при чему су циљеви смањења емисије једнаки претходно поменути, уз другачији приступ енергетском развоју. Усвојена је и нова Стратегија развоја енергетике Републике Србије до 2040. године са пројекцијама до 2050. године [18], што је довело до рада на доношењу новог Програма остваривања Стратегије [19].

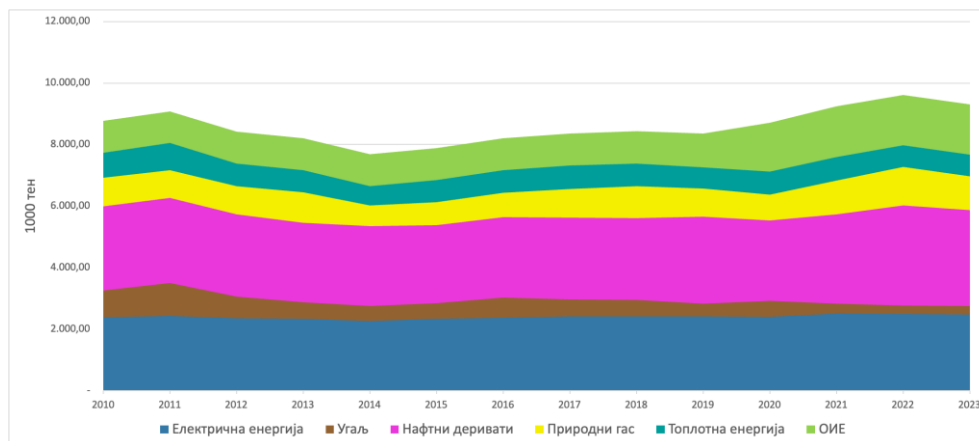
У свим наведеним документима, циљ смањења емисије је већ поменутих 33,3% у односу на нивое из 1990. године. Овде треба обратити пажњу да су многе поставке система урађене у при условима који су важили 2015. године, у време када је започета израда Стратегије нискоугљеничног развоја [20], а усвојена тадашња Стратегија развоја енергетике РС до 2025. године, са пројекцијама до 2030. године [21], и који су драматично измењени до данас, мада је део тих промена ажуриран у току претходних неколико година. **У међувремену усвојени су и други програми из области заштите животне средине у складу са планским системом, као и закони и подзаконска акта из области климатских промена.**

СТАЊЕ ЕНЕРГЕТИКЕ И ЕМИСИЈА ГХГ У РС

Примена мера енергетске ефикасности, веће коришћење обновљивих извора енергије, заштита животне средине и смањење утицаја на климатске промене представљени су као кључни елементи одрживе транзиције енергетског сектора Републике Србије [18].

Домаћа производња примарне енергије обухвата експлоатацију/коришћење домаћих ресурса угља, сирове нафте, природног гаса и обновљивих извора енергије (хидропотенцијал, геотермална енергија, енергија ветра, соларна енергија, биомаса) и у у 2023. години је износила 9,112 Мтен, а увоз 8,326 Мтен, чиме се обезбеђују потребне додатне количине сирове нафте и деривата нафте, природног гаса и угља. Укупна финална потрошња енергије (без потрошње у неенергетске сврхе) износила је 9,302 Мтен, при чему период у последњих 20так година карактеришу релативно мале промене у структури коришћених енергената, изузев значајног смањења удела коришћења угља, док је удео ОИЕ порастао, и близак је пројектованој вредности из претходне Стратегије (26,3% у односу на планираних 27% у 2020. години).

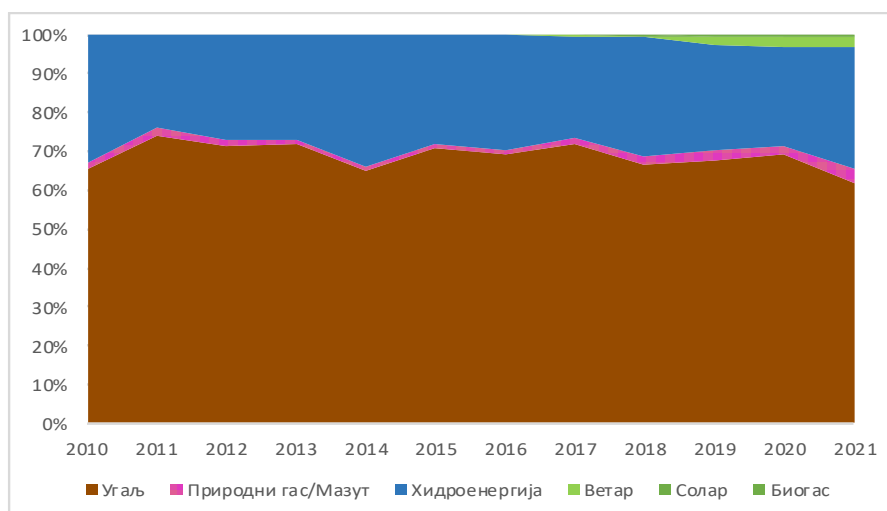
Иако удео фосилних горива у укупној расположивој енергији у разматраном периоду опада, и даље је изразито висок и у 2023. години је износио 83,2%, али се запажа изградња нових капацитета из обновљивих извора енергије (ОИЕ). Међутим, зависност од фосилних горива је и даље више него приметна, посебно у сектору производње електричне енергије (слика 3). Поред хидроенергије, значајан обновљиви енергетски извор у Републици Србији представља дрвна биомаса, која се користи пре свега за потребе индивидуалног



Слика 3. Финална потрошња за енергетске сврхе по горивима и енергентима

грејања у домаћинствима (око 1,4 милиона тен годишње). Међутим, и сектор топлотне енергије (системи даљинског грејања, енергане и индустријске топлане) доминантно је базиран на коришћењу фосилних горива.

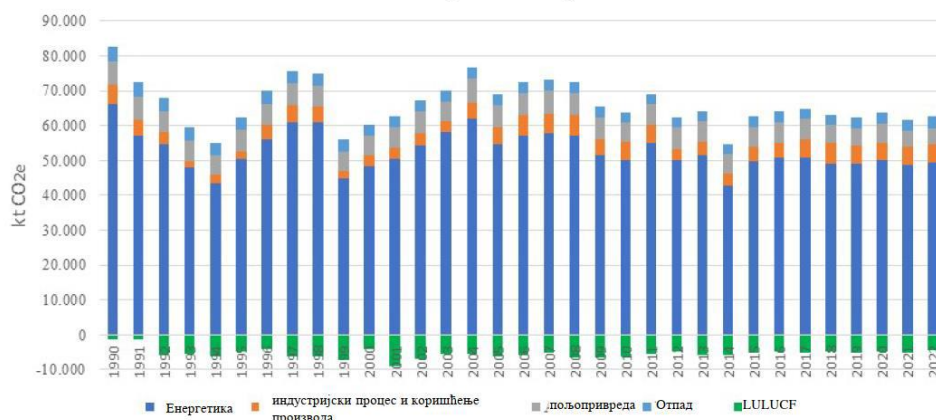
Показатељи енергетске ефикасности Републике Србије указују на релативно високу енергетску потрошњу по јединици бруто домаћег производа, уз тренд смањења који у периоду 2010-2023. година износи око 25% (слика 4)



Слика 4. Структура производње електричне енергије

У погледу емисија ГХГ (слика 5), оне су износиле 62.572,6 kt CO₂eq 2022. године, без доприноса сектора LULUCF што одговара смањењу од 24,3% у

Укупне емисије GHG



Слика 5. Развој емисија GHG у Републици Србији у периоду 1990-2022.

односу на нивое емисија из 1990. године. Од 2009. године и глобалне економске кризе, су углавном стабилне, осим 2014. године, када је услед великих поплава смањена производња угља, а тиме количина сагорелог горива.

Енергетски сектор био је доминантан извор емисија GHG у 2022. години у Републици Србији (као и у остатку периода), и допринео је националним емисијама GHG са 78,8%, не рачунајући допринос сектора LULUCF.

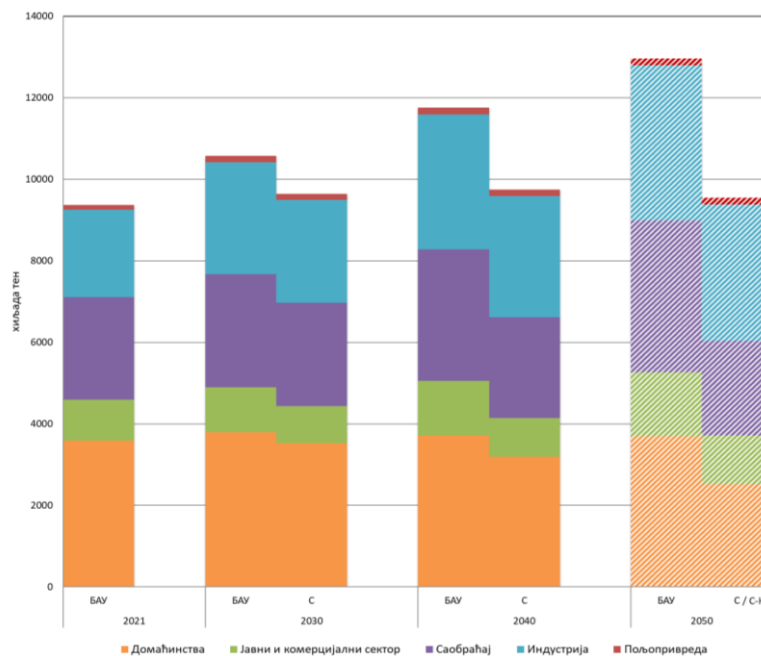
БУДУЋНОСТ ЕНЕРГЕТИКЕ И ЕМИСИЈА ГХГ

Као што стоји у Стратегији енергетике, енергетска безбедност, декарбонизација и економска конкурентност енергетског сектора су приоритети енергетског развоја и принципи на којима је потребно развијати енергетску политику. Треба обратити пажњу да ће на сектор енергетике огроман утицај имати и жељено придруживање ЕУ, али и знатно пре тога фаза ЦБАМ периода (тзв. угљенична такса на увоз, енгл. CBAM, carbon border tax или carbon border adjustment mechanism) [22], демографска кретања, као и значајне мере у циљу енергетске ефикасности, мада је и даље предвиђен пораст финалне потражње за енергијом.

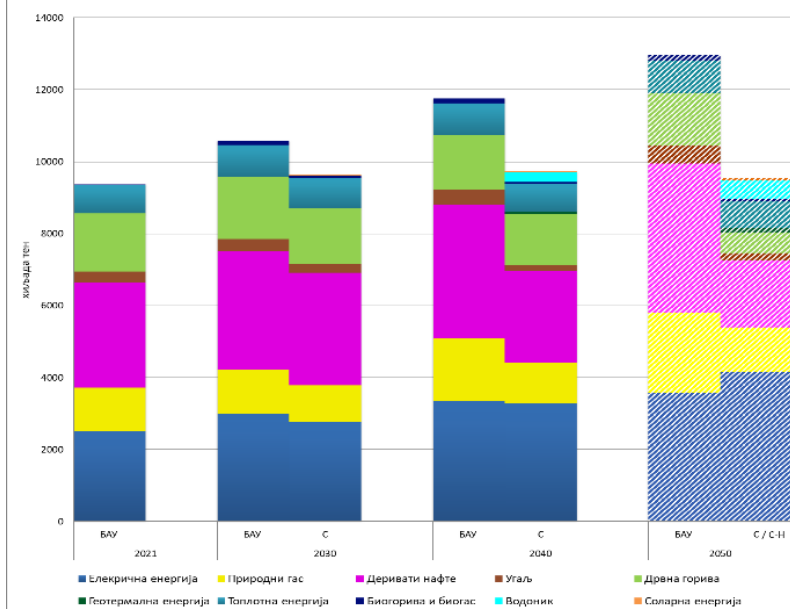
Пројекције укупне финалне потрошње енергије по секторима и енергентима за разматране сценарије су приказане на сликама 6 и 7, при чему према претпоставкама Сценарија С, финална потрошња енергије ће у разматраном периоду расти и достићи 9.750,3 хиљада тен у 2040. години, што је за око 17% мање у односу на БАУ сценарио.

Највеће промене ипак се очекују у електроенергетском сектору у промени структуре производних капацитета, уз напуштање фосилних горива у процесу декарбонизације. Уз прилагођен рад термоелектрана потребама, за очекивати је гашење појединих капацитета, потенцијална изградња нових гасних постројења, уз званично пуштање у рад блока ТЕ Костолац БЗ, снаге 350 MW, а очекивана годишња производње 2 TWh. У погледу ОИЕ, може се очекивати ревитализација са евентуалним повећањем снага постојећих хидроелектрана, а затим и доградња постојећих и изградња нових капацитета. Оно што је посебно значајно, извесна је даља експанзија соларних и ветро електрана, са укупна инсталисаном снагом 3,5 GW 2030. године. Производња електричне енергије према изворима до 2040. године приказана је на слици 8, а структура коришћених енергената за производњу топлотне енергије на слици 9.

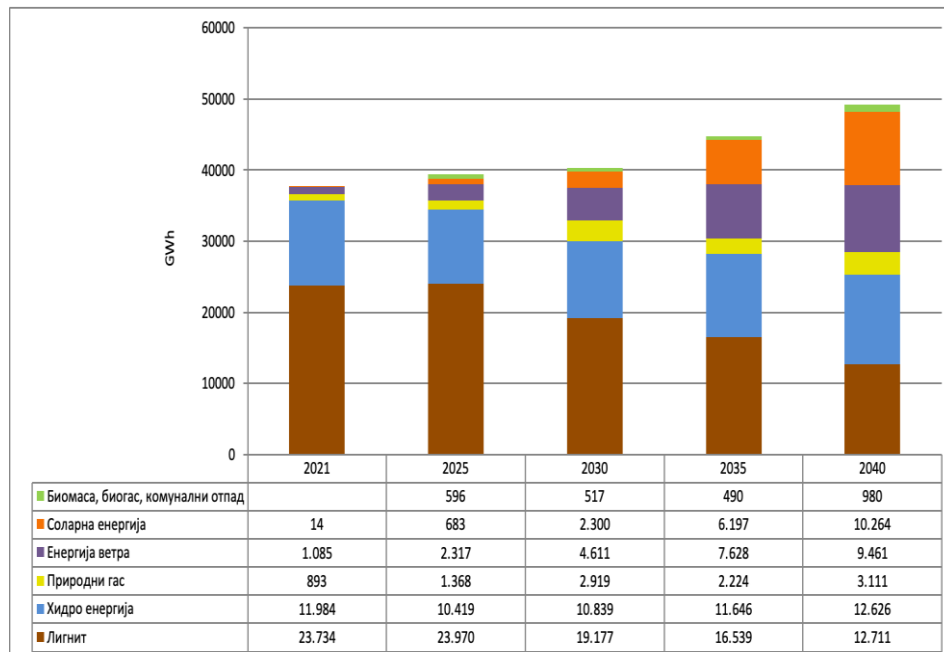
Очекивана производња електричне енергије из ОИЕ и могућности енергетске ефикасности приказане су на сликама 10 и 11.



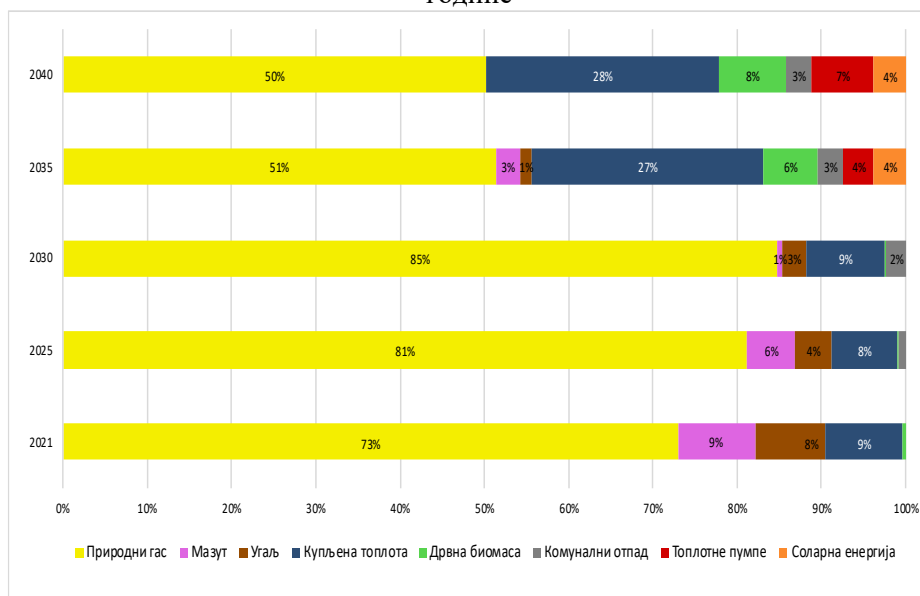
Слика 6. Пројекција финалне потрошње енергије по сценаријима и секторима



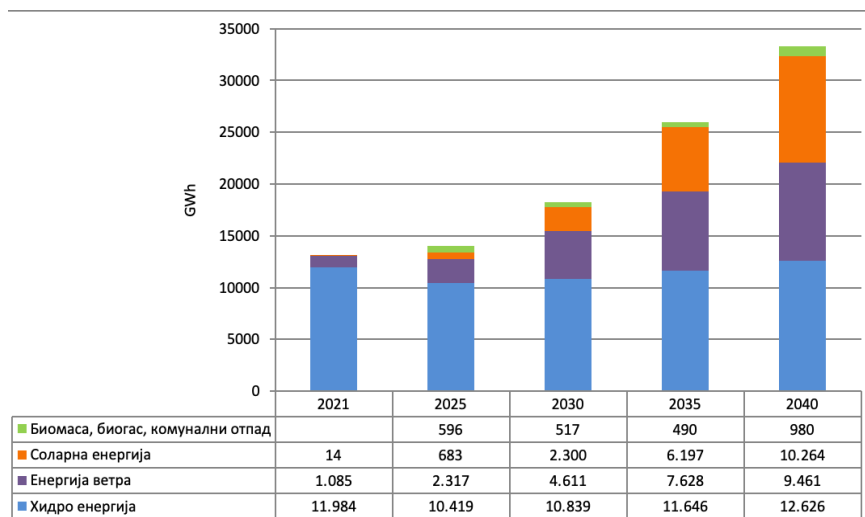
Слика 7. Пројекција финалне потрошње енергије по сценаријима и енергентима



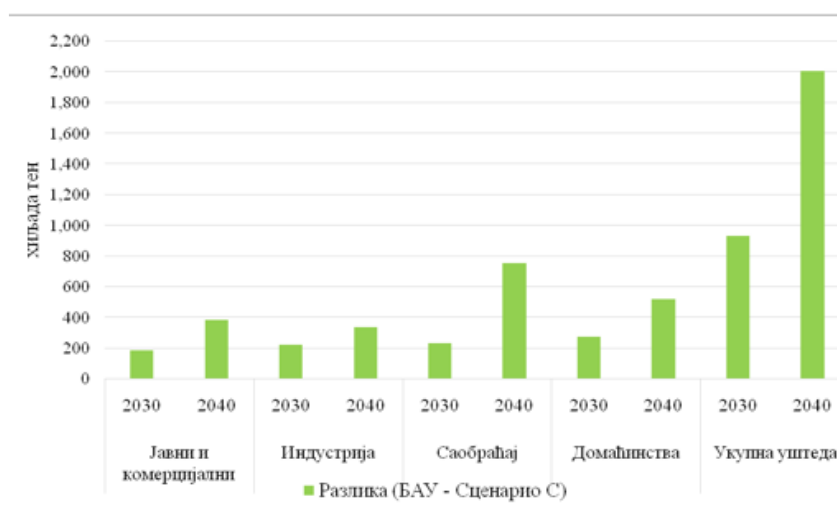
Слика 8. Производња електричне енергије према изворима енергије до 2040. године



Слика 9. Пројекција промене структуре енергената за производњу топлотне енергије у СДГ, 2021-2040.



Слика 10. Очекивана производња електричне енергије из ОИЕ до 2040. године



Слика 11. Процена уштеда финалне енергије у случају интензивне примене мера енергетске ефикасности и енергетског развоја према Сценарију C у односу на BAU сценарио

Као и у случају угља, потрошња природног гаса и течних фосилних горива, у складу са очекиваном интензивном декарбонизацијом, интензивнијом применом мера енергетске ефикасности, те већим коришћењем ОИЕ за

производњу електричне енергије, потрошња природног гаса и течних горива је нижа.

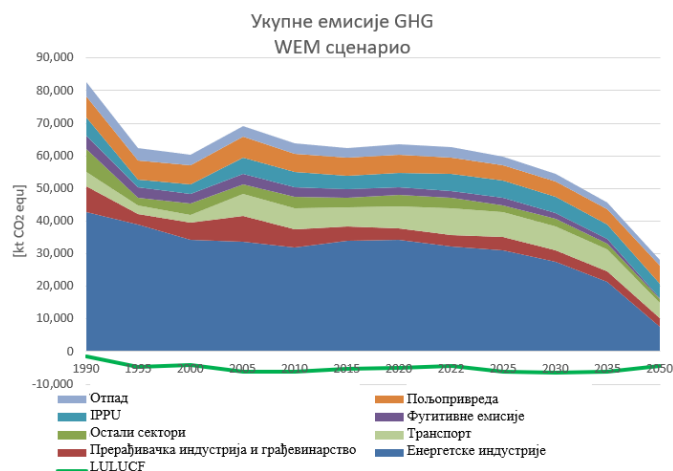
Што се тиче производње водоника не треба имати превисока очекивања, те се може очекивати изградња демонстрационог постројења за производњу, складиштење и коришћење, уз веће коришћење зеленог водоника у сектору саобраћаја и појединим индустријским процесима у којима је и сад водоник заступљен, али добијен на традиционалан начин. У Стратегији је размотрено и учешће нуклеарне енергије у енергетском миксу Републике Србије, па би тако нуклеарна електрана снаге 1.000 MW пуштена у рад 2040. године довела до смањења производња из термоелектрана на лигнит и природни гас.

У енергетским планирањима нису заборављени ни производња енергије из отпада и биогаса, чије коришћење може значајно да допринесе значајном смањењу емисије у производном циклусу, те повећању конкурентности производа, коришћењу ђубрива које је добијено као нус-производ уместо вештачких, остварењу циркуларне економије, смањењу емисије метана, подстицању руралног развоја и сл. [23].

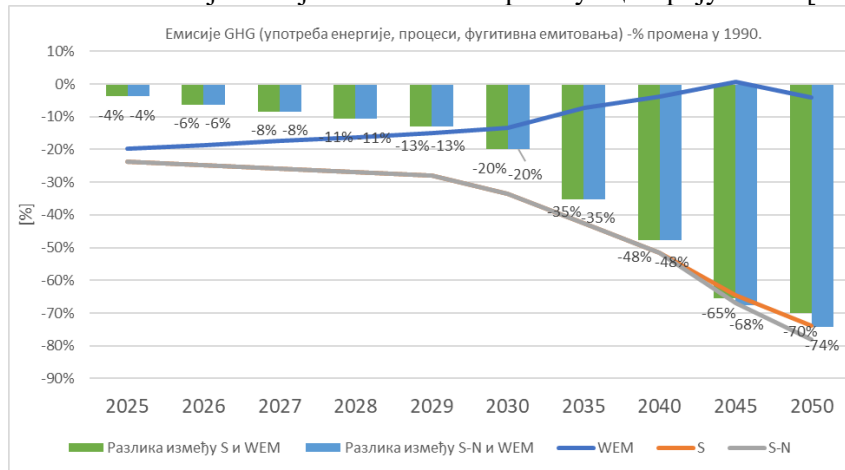
У погледу емисија ГХГ, приказаним у БТР и усклађеним са привредним кретањима датим у стратегијама енергетике и заштите животне средине, размотрена су три сценарија, тј. БАУ/WOM, сценаријо са мерама (WEM), и сценаријо са додатним мерама (WAM).

Сценарио без мера, или БАУ, тј. WOM, је као и у случају енергетских планирања непожељан сценарио, с обзиром да доводи до повећања емисија, које је неприхватљиво из више разлога. Сценарио са додатним мерама, WAM, представља у потпуности усклађен сценарио са постојећим законодавством ЕУ, без узимања у обзир Зеленог споразума ЕУ и доводи до смањења емисија GHG без уклањања кроз поноре (LULUCF) у 2050. години за 76,6 % и 69,6% у односу на 2010. годину, што и даље не доводи до постизања угљеничне неутралности, па би у будућем периоду то требало да буде циљ наредних активности моделирања.

Према сценарију са мерама (WEM), очекује се да ће емисије до 2050. године бити смањене за 65,9% у односу на 1990. годину и 55,8% у односу на 2010. годину (слика 12), што одговара већ приказаном смањењу од 33,3% у 2030. години у односу на 1990. годину, приказаном у свим другим стратешким документима (слика 13).



Слика 12. Развој емисија GHG по секторима у сценарију WEM [15]



Слика 13. Смањење емисија ГХГ у периоду до 2050 [17]

Ово не указује на значајне амбиције у погледу смањења емисије ГХГ што може имати негативан ефекат на извозне производе у земље ЕУ, у складу са увођењем СВМ од стране ЕУ. Увођење наплате емисија у оквиру саме РС, у извесној мери би представљало и превентивни одговор на овај механизам.

ЗАКЉУЧАК

Стратешка документа међусобно се прожимају и без обзира на разлике у путевима развоја, воде идентичном смањењу емисије ГХГ у периоду 2030/1990 али и касније. Иако је РС јасно изразила своју приврженост енергетској

транзицији, велики изазов за остварење визије и постизање наведених циљева лежи у социјалној сфери. Транзициони процес захтева широку друштвену подршку, али пре свега политичку вољу да се тај циљ и оствари. Избегавање суочавања са последицама нечињења озбиљних заокрета у управљању рударско енергетским сектором може нас значајно удаљити од цивилизацијски развијених земаља света. Из тога разлога, неопходно је:

- смањење коришћења угља и значајно повећање учешћа ОИЕ за производњу електричне енергије;
- значајно повећање ОИЕ у производњи топлотне енергије
- интензивна примена мера енергетске ефикасности
- подстицање уласка у ланце снабдевања критичним сировинама
- веће улагање у истраживачке капацитете и иновације
- вођење рачуна о праведној транзицији уз повећање амбиција у циљу већег смањења емисија ГХГ

ЛИТЕРАТУРА

1. IRENA (2022). Available at: <https://www.irena.org/Digital-Report/World-Energy-Transitions-Outlook-2022>
2. Јововић, А., Утицај необновљивих и обновљивих извора на климатске промене и животну средину, у: Енергија као један од највећих изазова човечанства у 21. веку, Циклус предавања, Књига 7, САНУ, 2023, стр. 277-316, ISBN 978-86-7025-972-0
3. Callaghan, M., Schleussner, CF., Nath, S. *et al.* Machine-learning-based evidence and attribution mapping of 100,000 climate impact studies. *Nat. Clim. Chang.* **11**, 966–972 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01168-6>
4. Santos, R., Bakhshoodeh, R., Climate change/global warming/climate emergency versus general climate research: comparative bibliometric trends of publications, *Heliyon* **7** (2021) e08219, <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e08219>
5. Јововић, А., Тодоровић, Д., Утицај термоелектрана на ким на животну средину и климатске промене и њихова будућност, у Енергетски ресурси на Косову и Метохији, зборник радова са научног скупа одржаног 17. и 18. јануара 2022., САНУ, 2023., стр. 193-222, ISBN 978-86-7025-981-2
6. Божанић, Д., Митровић, Ђ., Студија о социо-економским аспектима климатских промена у Републици Србији, УНДП, Србија, 2019.
7. Закон о потврђивању споразума из Париза, Сл. гл. РС, бр 4/17
8. Уговор о основању Енергетске заједнице, Сл. гл. РС, 62/2006)
9. Споразум о стабилизацији и придруживању, Сл. гл. РС, бр. 83/2008)

10. Први извештај Републике Србије према *UNFCCC*, 2010.
11. Други извештај Републике Србије према *UNFCCC*, 2017.
12. Трећи извештај Републике Србије према *UNFCCC*, 2024
13. Први ажурирани двогодишњи извештај, 2016.
14. Други ажурирани двогодишњи извештај Републике Србије према *UNFCCC*, 2023.
15. Први двогодишњи извештај о транспарентности Републике Србије према Оквирној конвенцији УН о промени климе и Споразуму из Париза, 2024.
16. <https://unfccc.int/NDCREG> (приступљено 15.2.2025. године)
17. Интегрисани национални енергетски и климатски план Републике Србије за период до 2030. године са визијом до 2050. године, Сл. гл. РС, бр. 70/2024
18. Стратегија развоја енергетике Републике Србије до 2040. године са пројекцијама до 2050. године, Сл. гл. РС, бр. 94/2024
19. ***Програм остваривања стратегије развоја енергетике Републике Србије до 2040. године са пројекцијама до 2050. године, нацрт, Министарство рударства и енергетике, Београд, 2025.***
20. Стратегија нискоугљеничног развоја Републике Србије за период од 2023. до 2030. године са пројекцијама до 2050. Године, Сл. гл. РС, бр. 46/2023.
21. Стратегија развоја енергетике Републике Србије до 2025. године са пројекцијама до 2030. Године, Сл. гл. РС, бр. 101/2015
22. https://taxation-customs.ec.europa.eu/carbon-border-adjustment-mechanism_en (приступљено 15.2.2025. године)
23. Кијевчанин, М., Јововић, А., Производња биогаса, у: Потенцијал и ефекти коришћења биомасе у Републици Србији, зборник радова са научног скупа одржаног 2. и 3. новембра 2022., САНУ, 2023, стр. 99-121, ISBN 978-86-6184-057-9



Годишња конференција Научног друштва Србије
ГОДКОН 2024.
31. октобар – 1. новембар 2024. Београд

РАДИОАКТИВНИ ОТПАД У СРБИЈИ: КАКО И ГДЕ СА ЊИМ?

Др Илија Плећаш

"Треба истаћи да је нуклеарна техника прва почела да примењује заштиту животне средине. Она је у томе далеко отишла. Њен пут могао би да послужи као узор којим треба ићи и при успешном решавању многих проблема загађења животне средине и њене заштите."

Слободан Кончар Ђурђевић

Увод

У Србији се радиоактивни отпад (РАО) налази у западном делу локације коју деле Институт за нуклеарне науке "Винча" и Јавно предузеће "Нуклеарни објекти Србије" (НОС), непосредно уз насеље Винча. После санације отворене депоније отпада осамдесетих година прошлог века као и досадашњих резултата пројеката санације стања отпада, он је ускладиштен углавном у два хангара (Х1 и Х2) и четири подземна базена (ВР-1-4) у Јавном предузећу као и у два новоизграђена објекта (Х3 и БС). Осим тога, изван зоне ових складишних објеката, радиоактивни отпад и истрошени извори јонизујућих зрачења могу се наћи и на још неколико месту у лабораторијама Института. Због могућег штетног утицаја овог отпада на сараднике ове две институције, становнике околних насеља и животну средину у ширем региону Београда, у случају природног или вештачки изазваног акцидента, овај проблем већ више од 50

година закупа и брине јавност Србије, која непрекидно поставља иста питања:

Како и где са њим?

Одговор на прво питање могу да дају стручњаци из области прераде, складиштења и одлагања радиоактивног отпада, док се одговор на друго питање мора имати када се отпад преради и ускладишти. Наравно, постављају се и питања средстава и рока за обављање овог сложеног посла. Одговоре на њих може дати само Влада Србије.

Радиоактивни отпад као глобални проблем

Специфичност делатности које укључују радиоактивни материјал или изворе јонизујућих зрачења је неизбежност настајања радиоактивног отпада. У фазама откривања и првих примена извора зрачења, које је карактерисао велики истраживачки ентузијазам, још увек није био оформљен систематски приступ заштити од зрачења и поступању са таквим отпадом. Развојем нуклеарних реактора, прво истраживачких а затим и енергетских, величина и сложеност проблема генерисања и прераде радиоактивног отпада постаје очигледнија. Као резултат, јача свест о потреби дефинисања заједничких сигурносних принципа у развоју и примени нуклеарних технологија, укључујући решавање проблема отпада, и успостављају се први стандарди сигурности.

Преко 90 % радиоактивног отпада ствара се током рада нуклеарних електрана и у осталим фазама нуклеарног горивног циклуса, почевши од ископавања руде уранијума све до декомисије електрана. У нуклеарним електранама свакодневно се производи радиоактивни отпад, као технолошки отпад који укључује делове опреме (цеви, вентиле и мераче...), алате, отпад настао при пречишћавању воде и гасова (филтри и јоноизмењивачке смоле), заштитну опрему (комбинезоне, рукавице, чизме, крпе и вату), и др. РАО такође настаје у истраживачким центрима, здравственим и војним институцијама и индустрији.

Енергетски програми многих држава заснивају се на све већем уделу нуклеарне енергије. Према последњим подацима, у свету тренутно ради 449 нуклеарних електрана, које су до сада, у периоду од око 60 година, произвеле око 30 милиона m^3 радиоактивног отпада. За реализацију тих програма издвајају се велика финансијска средства, која се користе и за решавање проблема прераде, складиштења и одлагања таквог отпада, који представља

њихов најозбиљнији технолошки проблем. Резултати до којих се тако долази користе се и за решавање проблема радиоактивног отпада који нису повезани са нуклеарним електранама. У вези с тим, треба истаћи да правилно решавање ових проблема представља најбољи пример темељног инжењерског приступа заштити животне средине, који се заснива на принципу АЛАРА, (онолико ниско колико је могуће достићи) као једном од основних принципа заштите од јонизујућих зрачења, везаном за развој и примену нуклеарних технологија.

Пут од истраживања до обавезујућих прописа у области управљања радиоактивним отпадом није ни кратак ни једноставан. Велики број различитих и углавном координираних међународних пројеката у овој области одвија се у великом броју истраживачких центара. Међународна комисија за заштиту од зрачења као врхунско међународно стручно тело, периодично сублимира резултате тих истраживања по појединим темама и публикује их у виду релевантних препорука за примену нуклеарних технологија, и то у посебним публикацијама и часопису *Annals of the ICRP*.

У следећем кораку, Међународна агенција за атомску енергију (МААЕ) уграђује формиране научне и стручне ставове у стандарде сигурности, који су организовани на више нивоа – од принципа сигурности, преко захтева сигурности, како општих тако и специфичних за поједине објекте односно делатности, до упутстава, такође општих и специфичних за испуњавање захтева сигурности. Приступ решавању проблема радиоактивног отпада који се препоручује земљама са нуклеарним енергетским програмом разликује се од приступа који се препоручује земљама које немају такав програм, па не генеришу веће количине таквог отпада. Међународни консензус о захтевима сигурности у управљању отпадом формулисан је у *Заједничкој конвенцији о сигурности управљања истрошеним горивом и о сигурности управљања радиоактивним отпадом*, која се односи на отпад и истрошено нуклеарно гориво. Овај документ је ратификовао "Евратом", што значи да исто очекује Србију у процесу приступању ЕУ.

Радиоактивни отпад у Србији

Институт у Винчи био је први и највећи нуклеарни институт у Југославији. Убрзо по оснивању, Савезна комисија за нуклеарну енергију Југославије одређује Институт као једину установу у земљи за бављење сакупљањем и чувањем, а касније и обрадом и складиштењем радиоактивног отпада. Складишта таквог отпада у Институту налазила су се на неколико места. Како је временом количина сакупљеног отпада расла, Влада Југославије је у два наврата, 1961. и 1982. године, донела одлуку о изградњи наменског складишног објекта. За земљу која је тада имала само истраживачки нуклеарни

програм, та решења су била примерена величини проблема отпада у том програму.

Институт у Винчи, који се налази на око 12 km од центра Београда, сакупљао је и складиштио сав РАО генерисан у оквиру сопствених истраживања, истраживања у другим центрима, и разних примена у здравственим и војним институцијама и индустрији. До 1990. године, у Институту је складиштен и отпад из других република Југославије.

Почетак бављења проблемом одлагања радиоактивног отпада у Србији везан је за почетак реализације нуклеарног енергетског програма Југославије, чији је крајњи циљ био изградња неколико нуклеарних електрана. План је био да се средином осамдесетих година прошлог века изграде две нуклеарне електране електричне снаге по 1.000 MW, а затим још четири електране укупне снаге 4.000 MW. У том програму било је предвиђено и решавање питања отпада произведеног у тим електранама. Акцидент у нуклеарној електрани у Чернобилу, у Совјетском Савезу, битно је допринео да се од тог плана одустане, као у већем броју других земаља. Изграђена је само једна нуклеарна електрана – у Кршком, на граници Словеније и Хрватске.

У то доба, друштвене групе које су се противиле изградњи нуклеарних електрана у Југославији искористиле су катастрофу у Чернобилу да се озбиљно супротставе свим нуклеарним активностима и плановима у земљи. У јуну 1989. године, Скупштина Југославије, на предлог Социјалистичке омладине Југославије, усвојила је *Закон о забрани изградње нуклеарних електрана*. Као резултат тог "мораторијума", на Универзитету у Београду укинута су практично сви предмети везани за област нуклеарних технологија, а у истраживачким центрима знатно су редуковани програми из те области. Тиме је задат озбиљан ударац активностима у Србији у области заштите од јонизујућих зрачења, која је изузетно значајна обзиром да у најближем суседству земље ради 19 нуклеарних електрана, и да се на њеној територији налазе несаниране заоставштине истраживачког нуклеарног програма – заустављени нуклеарни реактор, затворене нуклеарне лабораторије и релативно велике количине непрерађеног и неускладишеног радиоактивног отпада. Ипак научно истраживачки рад одвијао се све време, јер он није потпадао под забрану, везано за "Мораторијум", тако да је у том периоду урађен већи број експеримената и објављено више десетина научних и стручних радова, на тему обраде и одлагања радиоактивног отпада, при чему се у раду наводи само неколико [1-11]

После распада Југославије, два пута, 1997. и 2002. године, покренуто је питање одлагања радиоактивног отпада, али коначне стручне и политичке одлуке о начину решавања овог проблема нису биле донете. Уместо тога, Влада Србије је 2004. године донела одлуку о санацији складишта таквог отпада у Институту у Винчи. Један од очекиваних резултата те санације био је да се омогући да се РАО прерађен и ускладиштен у новоизграђеном хангару, ХЗ, и истрошени затворени извори јонизујућих зрачења кондиционирани и ускладиштени у новоизграђеном безбедном складишту јаких извора зрачења, БС, уз минималну додатну обраду или без ње, преместе у одлагалиште које ће бити изграђено на локацији која се, према стандардизованим критеријумима и уз учешће јавности, одабере негде у Србији.

Литература

1. I. Plećaš *et al.*, *Mathematical modeling of physico-chemical characteristics of concrete in immobilization of radioactive waste*, Cement and Concrete Research, 1991, Vol. 21 (5), p. 941.
2. I. B. Plećaš *et al.*, *Immobilization of radioactive waste water residues in a cement matrix*, Cement and Concrete Research, 1992, Vol. 22 (4), p. 571.
3. I. Plećaš *et al.*, *Leaching behavior of Co-60 and Cs-137 from spent ion exchange resins in cement matrix*, Cement and Concrete Research, 1992, Vol. 22 (5), p. 937.
4. I. Plećaš *et al.*, *Effect of curing time on the fraction of Co-60 and Cs-137 leached from cement matrix*, Cement and Concrete Research, 1995, Vol. 25 (2), p. 311.
5. I. Plećaš *et al.*, *Comparative leaching studies of Co-60 from spent radioactive ion-exchange resin incorporated in cement*, Cement and Concrete Research, 1995, Vol. 25 (2), p. 314.
6. A. Perić, I. Plećaš and R. Pavlović, *Influence of the incorporation of high and low-density polyethylene granules in mortar matrices on the characteristics of solidified radioactive waste*, Environment International, 1996, Vol. 22 (6), p. 729.
7. I. Plećaš, R. Pavlović and S. Pavlović, *Leaching behavior of Co-60 and Cs-137 from spent ion exchange resins in cement-bentonite clay matrix*, Journal of Nuclear Materials, 2004, Vol. 327 (2-3), p. 171.

8. I. Plećaš, S. Dimović and I. Smičiklas, *Influence of bentonite and zeolite in cementation of dry radioactive evaporator concentrates*, Applied Clay Science, 2008, Vol. 43 (1), p. 9
9. I. Plećaš, *Modeling of transport phenomena in concrete porous media*, Health Physics, 2014, Vol. 106 (2), p. S30
10. I. Plećaš, A. Perić and A. Kostadinović, *The migration of Cs-137 and Co-60 through cementitious barriers applicable to radioactive waste conditioning*, Annals of Nuclear Energy, 1992, Vol. 19 (9), p. 507.
11. I. Plećaš, *Effect of curing time on the fraction of Cs-137 from cement matrix*, Annals of Nuclear Energy, 2003, Vol. 30 (15), p. 1587.



Годишња конференција Научног друштва Србије
ГОДКОН 2024.
31. октобар – 1. новембар 2024. Београд

„ITERATIVE LEARNING CONTROL“ - ПРЕГЛЕД ТЕОРИЈСКИХ ПРИСТУПА И ИНДУСТРИЈСКЕ ПРИМЕНЕ

Милан Матијевић
Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу

Драган Костић
R&D Director, Enabling Technology Mechatronics, ASMPT
Center of Competency, Platinawerf 20, Beuningen, 6641 TL, The
Netherlands

АПСТРАКТ

Итеративно учење управљања („Iterative Learning Control“ – ILC) је релативно нов приступ у теорији управљања, намењен динамичким системима који понављају своја стања и референтне трајекторије кроз итерације, као што су то роботски системи у серијској производњи или хемијски реактори у шаржним процесима. Основна идеја овог концепта је да систем учи из претходних итерација, а на основу података из претходне итерације, користећи принцип унапредног (feedforward) управљања, систем коригује своје управљачке променљиве у наредној итерацији, чиме се побољшавају перформансе система, посебно у смислу прецизности праћења референтних трајекторија.

У овом раду, на примеру система са једним улазом и једним излазом, биће представљена два доминантна теоријска приступа синтезе ILC алгоритама. Такође, у краћим цртама, биће дат и шири преглед стања у области. Посебна пажња је посвећена илустрацији ефеката ILC сигнала у савременим индустријским применама. Овај концепт управљања игра све значајнију улогу

у свим областима високопрецизног инжењерства, чак и у присуству нелинеарности и неизвесности у моделу управљаног система.

УВОД

Итеративно учење управљања („Iterative Learning Control“ – ILC) је стратегија управљања која омогућава побољшање перформанси система који понавља исте задатке, учећи из претходних итерација [1]. Као што кошаркаш усавршава шут на слободном бацању понављањем, тако и систем учи кроз сваку итерацију, користећи информације о претходним грешкама како би прилагодио своје будуће акције у праћењу референтне трајекторије [2]. Иако је концепт ILC-а релативно нов, корени ове методе потичу из 1970-их година, а њена прва примена забележена је чак и у ранијим патентима [3]. За разлику од традиционалних контролера, који не користе информације из претходних понављања, ILC укључује грешке из претходних итерација у своју стратегију управљања. Овај приступ омогућава прецизније праћење референтне трајекторије, чак и када модел система није потпуно познат или када постоје непознати, али понављајући поремећаји у свакој итерацији. Циљ ILC контролера је да, на основу меморисаних података из претходних итерација, генерише унапредну (feedforward) компоненту управљачког сигнала – а која ће, у наредној итерацији, елиминисати ефекте понављајућих поремећаја и минимизирати грешку праћења [2]. За разлику од контролера повратне спреге који реагује на референтне сигнале и поремећаје тек по њиховом појављивању, ILC контролер делује предиктивно, ослањајући се на научене податке из претходних итерација. Овај приступ омогућава елиминацију кашњења која ограничавају перформансе класичних контролера, чиме се значајно побољшавају динамичке перформансе система. ILC не захтева да егзогени сигнали (референце или поремећаји) буду унапред познати или мерљиви (на пример, спољна температура може бити мерена, као спољни поремећај, пре него што проузрокује ефекте на процес). Међутим, ILC претпоставља да се егзогени сигнали понављају на исти начин из итерације у итерацију, што је често случај код система за управљање кретањем [4]. ILC сигнал има природу унапредног (feedforward) управљачког сигнала који се генерише кроз процес конвергенције током више итерација. Израчунавања за текућу итерацију заснивају се на подацима из претходних итерација, чиме се постепено побољшава тачност управљања. На овај начин, ILC припада породици алгоритама „вођених подацима“ (data-driven control algorithms), и погодан је за решавање изазова као што су нелинеарност, непотпуно познавање модела и минимизација динамичке грешке у праћењу референтне трајекторије [4].

Прва књига из области ILC-а је фокусирана на детерминистичке системе [5], док се тридесет година касније, у књизи [6], детаљно дискутују ILC

примене на линеарне, нелинеарне, дистрибуиране, и стохастичке системе. У раду [7] се истражују приступи анализе и синтезе у фреквенцијском домену, као и дигиталне имплементације ILC алгоритама у индустријским системима. Књига [8] анализира ILC у системима са референтном трајекторијом чије је трајање случајна променљива. Прегледни радови [9, 10] су фокусирани на стохастичке ILC алгоритме и ILC алгоритме са некомплетним информацијама, респективно. Прегледни рад [2] објашњава развој методологија анализе и синтезе ILC система током претходних деценија и указује на растући значај ILC алгоритама у микро- и нано- производњи. Прегледни рад [3] категоризује дотадашње примене ILC-а и идентификује његову употребу у специјализованим областима као што су роботика, управљање процеса, производња полупроводника и биоинжењеринг. Бројне докторске дисертације, попут [11-13], нуде свеобухватну систематизацију претходних резултата, обухватајући теоријске и примењене анализе. На основу поменуте литературе, у [14] су издвојена три главна приступа синтези ILC алгоритама: 1) хеуристички, 2) заснован на инверзији динамичког модела система или управљаног подсистема, и 3) заснован на решавању оптимизационих проблема.

Сврха овог рада је да пружи преглед основних теоријских концепата синтезе и примене ILC алгоритама, сажме тренутно стање у овој области, и понуди увид у актуелне истраживачке трендове, посебно са становишта ефеката примене ILC-а у савременој индустрији и апликацијама високопрецизног инжењерства.

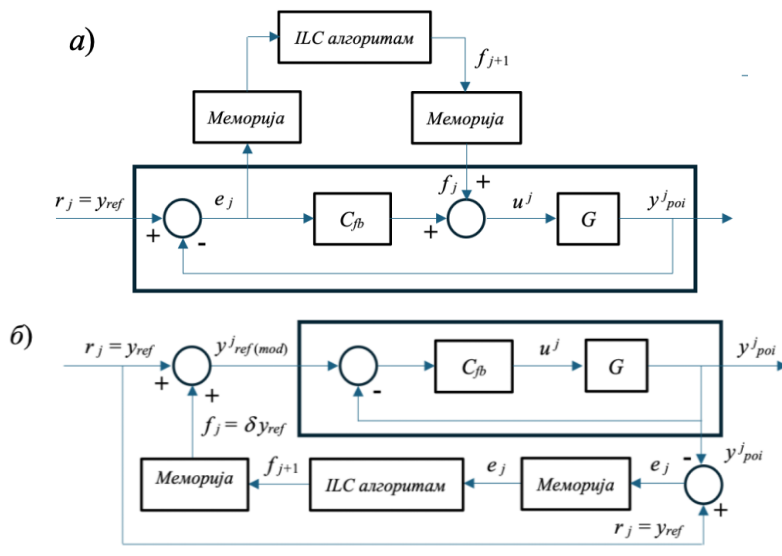
ILC СИНТЕЗА ЗАСНОВАНА НА ИНВЕРЗНОМ ДИНАМИЧКОМ МОДЕЛУ

Итеративно учење управљања („Iterative Learning Control“ – ILC) може значајно побољшати перформансе система који извршавају задатке који се понављају. На Слици 1 је приказана интеграција ILC сигнала у систем са повратном спрегом, где индекс j означава j -то понављање или итерацију функционисања система. После сваке итерације j , ILC сигнал f_{j+1} се ажурира за следећу итерацију $j+1$, користећи податке из претходне итерације. Овим итеративним процесом, ILC сигнал се поступно унапређује, што побољшава управљачки сигнал и перформансе система.

ILC систем функционише у два домена: временском (или фреквенцијском) и домену итерација. Временски или фреквенцијски домен прати динамику објекта управљања (G) и понашање система са повратном спрегом (уоквирен део на Слици 1). Домен итерација прати конвергенцију ILC сигнала f_{j+1} и промену динамике система из итерације у итерацију (кроз праћење комплетно измерених секвенци сигнала у j -тој итерацији, попут сигнала грешке праћења

e_j). Домен итерација је у “offline” режиму у односу на динамичко функционисање система, што значи да се ILC сигнал f_{j+1} израчунава између итерација j и $j+1$.

Задата трајекторија се не мења ($r_j = const$), па ће научени ILC сигнал бити оптималан само за тај специфични задатак (r_j). Важна претпоставка је да систем у свакој итерацији има иста почетна стања, као и да су ефекти поремећаја идентични током свих итерација.



Слика 1 Интеграција ILC сигнала у постојећу структуру система са повратном спрегом: а) паралелна ILC интеграција, б) серијска ILC интеграција у систем

Проблем синтезе ILC алгоритма се своди на итеративно израчунавање ILC сигнала f_{j+1} , уз услов да процес конвергира тако да минимизира грешку праћења e_{j+1} . Општа једначина ажурирања ILC сигнала је дата изразом:

$$f_{j+1}(z) = Q(z)(f_j(z) + L(z)E_j(z)) \quad (1)$$

где је дискретна функција преноса $L(z)$ филтар учења, а $Q(z)$ филтар робустности. Пошто се израчунавање релације (1) спроводи “offline”, а секвенце сигнала f_j и e_j су у потпуности познате пре примене релације (1), могуће је некаузално филтрирање f_j и e_j дигиталним филтрима $Q(z)$ и $L(z)$. Типично, $Q(z)$ је нискофреквенцијски филтар.

За основну структуру система са повратном спрегом (уоквирен део на Слици 1), функција осетљивости $S(z)$, функција процесне осетљивости $PS(z)$, и комплементарна функцију осетљивости $T_{cs}(z)$ су дефинисане на следећи начин:

$$S(z) = \frac{G(z)}{1+C_{fb}(z)G(z)}; \quad PS(z) = S(z)G(z); \quad T_{cs}(z) = \frac{C_{fb}(z)G(z)}{1+C_{fb}(z)G(z)}. \quad (2)$$

где су $C_{fb}(z)$ и $G(z)$ дискретне функције преноса контролера повратне спреге ($C_{fb}(z)$) и објекта управљања ($G(z)$), респективно. Да би постигли униформност разматрања и за паралелно и за серијски интегрисани ILC алгоритам у систем на Слици 1, уведемо смену:

$$X(z) = PS(z), \text{ за паралелно интегрисани ILC алгоритам} \quad (3a)$$

$$X(z) = T_{cs}(z), \text{ за серијски интегрисани ILC алгоритам} \quad (3b)$$

Сада израчунавамо једначину пропагације грешке праћења из итерације у итерацију:

$$E_{j+1}(z) = Q(z)[1 - X(z)L(z)] E_j(z) \quad (4)$$

Сагласно једначинама (4) и (3), грешка праћења монотono конвергира ако и само ако је:

$$|Q(z)[1 - X(z)L(z)]| < 1 \quad (5)$$

за све фреквенције f_h , где је $z = e^{i2\pi f_h T_s}$, а T_s периода одабирања. Из (4), израчунава се филтар учења $L(z)$ као инверзни динамички модел од $PS(z)$ или $T_{cs}(z)$ (видети (3a) и (3b)):

$$L(z) \approx (X(z))^{-1} \quad (6)$$

За мале периоде одабирања, дискретни модели често постају неминимално фазни (имају једну или више нестабилних нула). У таквим случајевима, израчунавање филтра учења $L(z)$ може бити изазов [15, 16]. Уобичајене апроксимативне методе израчунавања филтра (6), укључујући и популарну ZPETC методу [17], детаљно су обрађене у [16].

Ако тачно израчунавање филтра учења (6) није могуће (било да је каузалан или не), неопходно је проверити услов конвергенције (5) за $Q(z) \equiv 1$. Уколико услов није задовољен, требало би пројектовати филтар робустности ($Q(z) \neq 1$) како би се задовољио услов конвергенције (5). Графоналитичком анализом услова (5), за $Q(z) \equiv 1$, одређује се максимална фреквенцијска пропусност и минимална селективност филтра робустности $Q(z)$ [14].

ILC СИНТЕЗА ЗАСНОВАНА НА РЕШАВАЊУ ПРОБЛЕМА ОПТИМИЗАЦИЈЕ

За структуре система са Сlike 1, секвенце сигнала у итерацији j садрже коначан број одбирака N . Секвенца грешке праћења e_j и секвенца ILC сигнала f_j су:

$$\begin{aligned} e_j &= y_{ref} - y_{poi}^j = [e_j(0) \quad e_j(1) \quad \dots \quad e_j(N-1)]^T \\ f_j &= [f_j(0) \quad f_j(1) \quad \dots \quad f_j(N-1)]^T \end{aligned} \quad (7)$$

Утицај ILC сигнала f_j на излаз система y_{poi}^j може бити описан конволуционим моделом (где је на улазу система секвенца f_j и систем на излазу генерише секвенцу y_{poi}^j) и импулсним одзивом:

$$y_{poi}^j = X \cdot f_j; \quad X = \begin{bmatrix} X(0) & & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ X(N-1) & & X(0) \end{bmatrix}; \quad (8)$$

$$X = \begin{cases} PS, & \text{у складу са (3а), Слика 1а)} \\ T_{cs}, & \text{у складу са (3б), Слика 1б)} \end{cases}$$

Једначина пропагације грешке праћења из итерације у итерацију је:

$$e_{j+1} = e_j - X(f_{j+1} - f_j) \quad (9)$$

Формира се индекс перформансе или норма:

$$J(f_{j+1}) = \|e_{j+1}\|_{W_e}^2 + \|f_{j+1}\|_{W_f}^2 + \|f_{j+1} - f_j\|_{W_{\Delta f}}^2 \quad (10)$$

Циљ је да се израчуна ILC сигнал f_{j+1} који минимизира, односно, оптимизује норму $J(f_{j+1})$. Решење оптимизационог проблема је једначина ажурирања ILC сигнала:

$$f_{j+1} = L_o \cdot e_j + Q_o \cdot f_j \quad (11)$$

$$L_o = [(X)^T \cdot W_e \cdot PS + W_f + W_{\Delta f}]^{-1} [(X)^T \cdot W_e], \quad Q_o = [(X)^T \cdot W_e \cdot X + W_f + W_{\Delta f}]^{-1} [(X)^T \cdot W_e \cdot X + W_{\Delta f}]$$

Критеријум конвергенције ILC сигнала (11) и стабилности ILC система је аналитички:

$$\|Q_o - L_o \cdot X\|_{i2} < 1 \quad (12)$$

где је $\| \cdot \|_2$ највећа сингуларна вредност матрице $Q_o - L_o \cdot X$. Избор позитивно дефинитних и симетричних тежинских матрица W_e , W_f , и $W_{\Delta f}$ је у складу са компромисом између минимизације грешке праћења e_{j+1} , амплитуда/енергије управљачког сигнала, и брзине конвергенције ILC сигнала f_{j+1} . Препоруке избора матрица W_e , W_f , и $W_{\Delta f}$ су дискутоване у [14].

ILC – САВРЕМЕНЕ ИНДУСТРИЈСКЕ ПРИМЕНЕ, ЕФЕКТИ И ИЗАЗОВИ

Савремене индустријске примене ILC-а су најчешће повезане са апликацијама високо-прецизног инжењерства. Дobar илустративни пример су специјализоване "wirebonder" машине за израду полупроводничких компоненти и рачунарских чипова [4]. Једна таква машина компаније ASMPT Ltd. Приказана је на Слици 2 [19]. Она се користи за израду интерконекција (жица) између интегрисаних кола у производњи рачунарских чипова. Висока



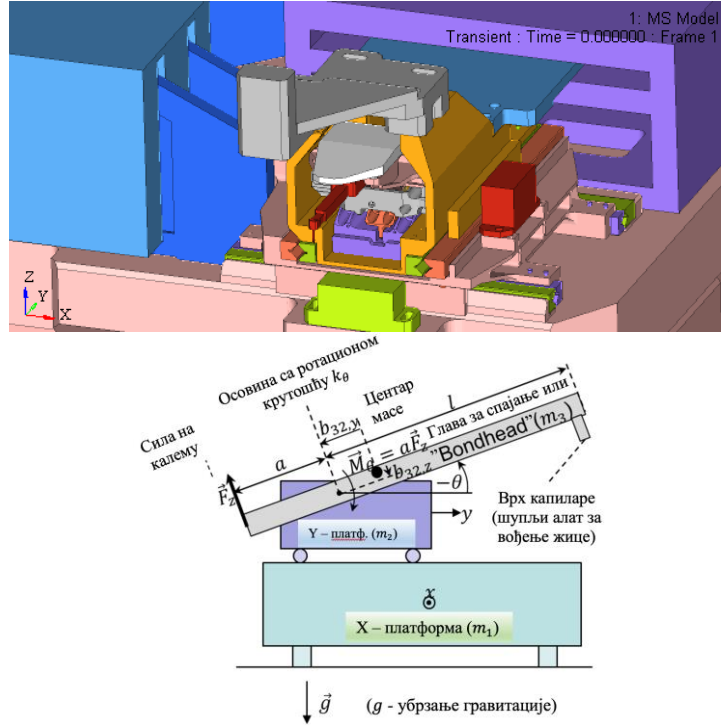
Слика 2 AERO Bonder [19]

продуктивност и квалитет производње подразумевају да машина мора изводити брза, прецизна, и тачна кретања са великим убрзањима. У том контексту, конкуренција и тржиште намећу ограничења у цени, као и трку за што напреднијим функционалностима и перформансама. Управљање кретањем је кључно за унапређење перформанси, продуктивности и поузданости (ППП), које се подразумевано унапређују са сваки следећим моделом машине.

Из перспективе управљања кретањем, постоји неколико изазова за "wirebonder" машине [2, 4]. Први је да машина изводи веома прецизна и тачна кретања, и тако омогући густо спаковане интерконекције (жице) у ограниченем простору.

Други изазов произилази из потребе за већом продуктивношћу, и то је захтев за што већим брзинама и убрзањима, а без угрожавања тачности кретања. Трећи изазов је робустност и поузданост машина, јер треба обезбедити уједначене перформансе машина у индустријском окружењу, независно од корисника и специфичности његовог окружења. Треба избегавати мануелна подешавања сваке машине појединачно, као и осетљивост на евентуалне разлике у окружењу или варијације међу машинама.

ILC нуди погодан приступ за решавање наведених изазова. За илустрацију, размотримо проблем управљања кретања механичког "wirebonder" подсистема на Сл. 3.



Слика 3 Илустрација кретања у “wirebonder” машини: детаљни приказ платформе механичког подсистема (лево) и одговарајућа концептуална схема система крутих тела (десно)

Једначине кретања механичког система крутих тела са три степена слободе (према Слици 3) изведене су помоћу Лагранж-Ојлеровог формализма [19]:

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ aF_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_1 + m_2 + m_3 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 + m_3 & m_3 b_{32,y} \sin \theta + m_3 b_{32,z} \cos \theta \\ 0 & m_3 b_{32,y} \sin \theta + m_3 b_{32,z} \cos \theta & I_{3,xx} + m_3 (b_{32,y}^2 + b_{32,z}^2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \\ \ddot{\theta} \end{bmatrix} +$$

$$\begin{aligned}
& \begin{bmatrix} 0 \\ b_{32,y}\cos\theta - b_{32,z}\sin\theta \\ 0 \end{bmatrix} m_3 \dot{\theta}^2 - \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ b_{32,y}\cos\theta - b_{32,z}\sin\theta \end{bmatrix} m_3 g + \\
& \begin{bmatrix} f_{c,x}\text{sign}\dot{x} + f_{v,x}\dot{x} \\ f_{c,y}\text{sign}\dot{y} + f_{v,y}\dot{y} \\ t_{c,z}\text{sign}\dot{\theta} + t_{v,z}\dot{\theta} + k_\theta\theta \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{13}$$

где инерцијски параметри $m_1, m_2, m_3, b_{32,y}, b_{32,z}, I_{3,xx}$, коефицијенти трења $f_{c,x}, f_{c,y}, t_{c,z}, f_{v,x}, f_{v,y}, t_{v,x}$, и торзиона крутост k_θ , најчешће нису довољно прецизно познати за успешну интеграцију модела (13) у алгоритам унапредног (feedforward) управљања. Овај алгоритам требало да обезбеди високе перформансе кретања система.

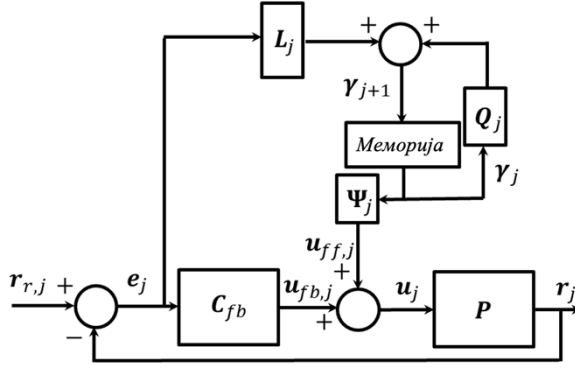
Једначине кретања (13) могу се представити у регресионом облику:

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ aF_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \psi_x(r, \dot{r}, \ddot{r}) \\ \psi_y(r, \dot{r}, \ddot{r}) \\ \psi_\theta(r, \dot{r}, \ddot{r}) \end{bmatrix} \gamma, \quad r^T = [x \quad y \quad \theta] \tag{14a}$$

$$\begin{aligned}
& \begin{bmatrix} \psi_x(r, \dot{r}, \ddot{r}) \\ \psi_y(r, \dot{r}, \ddot{r}) \\ \psi_\theta(r, \dot{r}, \ddot{r}) \end{bmatrix} = \\
& \begin{bmatrix} \ddot{x} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \text{sign}\dot{x} & 0 & 0 & \dot{x} & 0 & 0 \\ 0 & \ddot{y} & \ddot{\theta}\sin\theta + \dot{\theta}^2\cos\theta & \ddot{\theta}\cos\theta - \dot{\theta}^2\sin\theta & 0 & 0 & 0 & \text{sign}\dot{y} & 0 & 0 & \dot{y} & 0 \\ 0 & 0 & \ddot{y}\sin\theta - g\cos\theta & \ddot{\theta}\cos\theta + g\sin\theta & \ddot{\theta} & \dot{\theta} & 0 & 0 & \text{sign}\dot{\theta} & 0 & 0 & \dot{\theta} \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{14b}$$

$$\begin{aligned}
\gamma^T = & m_1 + m_2 + m_3 \quad m_2 + m_3 \quad m_3 b_{32,y} \quad m_3 b_{32,z} \quad I_{3,xx} + \\
& \left[+m_3(b_{32,y}^2 + b_{32,z}^2) k_\theta \quad f_{c,x} \quad f_{c,y} \quad t_{c,z} \quad f_{v,x} \quad f_{v,y} \quad t_{v,z} \right].
\end{aligned} \tag{14B}$$

На Слици 4, матрица P димензија 3×3 описује динамику кретања система крутих тела (Слика 3). Матрица C_{fb} такође има димензије 3×3 и описује контролер повратне спреге. Референтна трајекторија за све три осе кретања машине у итерацији j је дата вектором $r_{r,j} = r_{r,j+1} = r$, док вектор r_j даје



Слика 4 Управљачка структура са ILC алгоритмом за управљање “wirebonder” машине

реализована кретања машине за све 3 осе кретања у итерацији j . Грешка праћења за сва три степена слободе кретања је $e_j = r - r_j$, док вектор $u_{ff,j}$ садржи унапредне (feedforward) управљачке сигнале за сва 3 степена слободе кретања, а који су исход израчунавања ILC алгоритма заснованог на регресионом моделу (14а-в) објекта управљања.

ILC приступ се такође може користити за естимацију параметара модела објекта управљања, односно, вектора γ (14в), који се назива „базни скуп параметара“.

$$\gamma_{j+1} = L_j \cdot e_j + Q_j \cdot \gamma_j, \quad (15a)$$

где је

$$L_j = [\Psi_j^T ((PS)^T W_e PS + W_f + W_{\Delta f}) \Psi_j]^{-1} \Psi_j^T (PS)^T W_e, \quad (15b)$$

$$Q_j = [\Psi_j^T ((PS)^T W_e PS + W_f + W_{\Delta f}) \Psi_j]^{-1} \Psi_j^T [(PS)^T W_e PS + W_{\Delta f}] \Psi_j, \quad (15в)$$

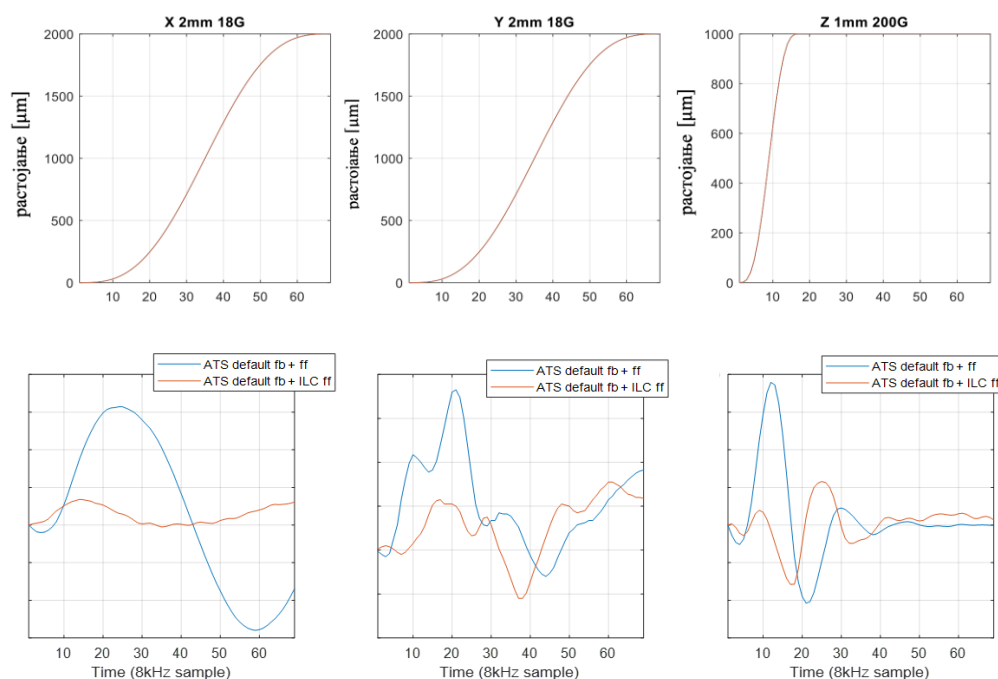
$$\begin{bmatrix} x_j \\ y_j \\ \theta_j \end{bmatrix} = r_j = \begin{bmatrix} PS_{xx} & PS_{xy} & PS_{x\theta} \\ PS_{yx} & PS_{yy} & PS_{y\theta} \\ PS_{\theta x} & PS_{\theta y} & PS_{\theta\theta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi_x(r_j, \dot{r}_j, \ddot{r}_j) \\ \psi_y(r_j, \dot{r}_j, \ddot{r}_j) \\ \psi_\theta(r_j, \dot{r}_j, \ddot{r}_j) \end{bmatrix} \gamma_j = PS \cdot \Psi_j \cdot \gamma_j. \quad (15г)$$

Унапредно (feedforward) управљање, означено као $u_{ff,j}$ на Слици 4, може се израчунати на основу ILC естимираног вектора базних параметара γ_j

$$u_{ff,j} = \Psi_j \cdot \gamma_j. \quad (16)$$

Релација (16) је ILC унапредни (feedforward) закон управљања заснован на моделу и итеративно естимираним параметрима модела. Итеративно естимирани параметри (15) могу послужити и у дијагностичке сврхе и сврхе предиктивног одржавања. Ефекти побољшања перформанси кретања система

услед примене закона управљања (16) су илустровани на Слици 5. Горњи ред слика на Слици 5 приказује готово идентичне референтне и остварене сигнале кретања за све три осе платформе "wirebonder" машине (Слика 3). Доњи ред слика на Слици 5 показује грешке праћења за све три осе, у случају 1) конвенционалног унапредног (feedforward) управљања (референтне брзине и убрзања појединачних оса кретања су једино узете у обзир); и 2) ILC унапредног (feedforward) закона управљања (16), који постиже значајно боље резултате (црвена боја на дијаграму).



Слика 5 Горњи ред: референтна и реализована кретања за све 3-осе платформе са Сlike 3

Доњи ред: грешке праћења референтних трајекторија за све 3-осе платформе са Сlike 3: Црвена линија - ILC управљање (16); Плава линија - конвенционално "feedforward" управљање

ЗАКЉУЧАК

У раду је представљен концепт итеративног учења унапредне (feedforward) компоненте управљачког сигнала (ILC сигнала). Фаза учења, која захтева сензоре у свим тачкама од интереса, разликује се од фазе експлоатације, у којој

је потребан само генерисани ILC сигнал. Објашњена је и паралелна и серијска интеграција ILC сигнала у постојећи систем, као и два доминантна теоријска приступа синтези ILC сигнала, заснована на: 1) инверзији динамичког модела, и 2) постављању и решавању проблема оптимизације. Посебну вредност рада чине илустративни примери ефеката примене ILC сигнала у савременој индустријској производњи. Илустрована је и могућност примене ILC алгоритама и у придруженим функцијама савремених машина, попут функција за дијагностику и предиктивно одржавање. У кратким цртама, дато је стање у области, и посебно, представљени су изазови и достигнућа примена у индустрији.

РЕФЕРЕНЦЕ

1. Wang Y, Gao F and Doyle FJ, Survey on iterative learning control, repetitive control, and run-to-run control, *Journal of Process Control*, 19 (2009), pp. 1589-1600.
2. Bristow DA, Tharayil M and Alleyne AG, A survey of iterative learning control: A learning-based method for high-performance tracking control, *IEEE Control Systems Magazine*, 26 (2006), pp. 96-114.
3. Ahn HS, Chen Y and Moore KL, Iterative learning control: Brief survey and categorization. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, 37 (2007), 6, pp. 1099-1121.
4. Boeren F, Bareja A, Kok T, et al., Frequency-domain ILC approach for repeating and varying tasks: With application to semiconductor bonding equipment, *IEEE Transaction on Mechatronics* 21 (2016), 5, pp. 2716-2727.
5. Moore, K.L., Iterative Learning Control for Deterministic Systems, Springer-Verlag, London, 1993.
6. Rogers, E., Chu, B., Freeman, C., et al., Iterative Learning Control Algorithms and Experimental Benchmarking, Wiley, New York, 2023.
7. Wang Y, Gao F and Doyle FJ, Survey on iterative learning control, repetitive control, and run-to-run control. *Journal of Process Control* 19 (2009), pp 1589–1600.
8. Shen D. and Li.X., Iterative Learning Control for Systems with Iteration Varying Trial Lengths: Synthesis and Analysis, Springer, Berlin, 2019.
9. Shen D and Wang Y, Survey on stochastic iterative learning control. *Journal of Process Control* 24 (2014), 12, pp 64–77.
10. Shen D, Iterative learning control with incomplete information: a survey. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica* (2018), pp. 885-901.
11. Norrlöf, M., Iterative Learning Control – Analysis, Design, and Experiments, Ph. D. thesis, Linköping University, Linköping, Sweden, 2000.

12. Bolder, J.J., Flexibility and Robustness in Iterative Learning Control: with Applications to Industrial Printers, Ph. D. thesis, TU/e, Eindhoven, Netherlands, 2015.
13. Koçan, O., Feedback via Iterative Learning Control for Repetitive Systems, Ph. D. thesis, ISAE-SUPAERO, Toulouse, France, 2020.
14. Matijević M, Filipović V and Kostić D, Comparative study of standard and norm-optimal iterative learning control, *Transactions of the Institute of Measurement and Control* (2024), in the process of review and publication.
15. van Zundert J and Oomen T, On inversion-based approaches for feedforward and ILC. *Mechatronics* 50 (2018): pp. 282–291.
16. Matijević M, Filipović V and Kostić D, Iterative learning control in manufacturing systems: Design of ILC algorithms and overview of model inversion techniques for ILC synthesis, Comparative study of standard and norm-optimal iterative learning control, *International Congress Motor Vehicles & Motors 2024*, Kragujevac, Serbia, October 10-11.
17. Tomizuka M, Zero phase error tracking algorithm for digital control. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control* 109 (1987), 1: pp 65–68.
18. AERO Bonder, <https://semi.asmpt.com/en/products/icd/wb/ball-bonding/eagle-aero/>, 2024.
19. Vukobratović, M. and Potkonjak, V., Dynamics of Manipulation Robots: Theory and Application, Springer Science & Business Media, Berlin, 2012.



Годишња конференција Научног друштва Србије
ГОДКОН 2024.
31. октобар – 1. новембар 2024. Београд

ЗЕЛЕНИ ИНХИБИТОРИ КОРОЗИЈЕ: ТЕХНОЛОШКИ И НАУЧНИ ПОТЕНЦИЈАЛ И ИЗАЗОВИ У СРБИЈИ

Анђела Симовић¹ и Јелена Бајат²

**¹Институ за хемију, технологију, металургију, Универзитет у
Београду, Његошева 12, Београд,**

**²Технолошко-металуршки факултет, Универзитет у
Београду, Ларнегијева 4, Београд**

АПСТРАКТ

Заштита метала од корозије је од техничког, економског, еколошког и естетског значаја. Једна од метода заштите је и употреба инхибитора. Услед токсичности многих органских и неорганских инхибитора, који су се као ефикасни деценијама користили, као и нових еколошких прописа, истраживања су већ годинама усмерена ка зеленим инхибиторима. То су супстанце које су еколошки прихватљиве, биоразградиве, доступне и обновљиве. У раду се сумирају експериментални резултати испитивања еколошки прихватљивих инхибитора корозије базираних на етарском уљу четинара: Панчићеве оморице и црног бора, као и њихових фитохемикалија. Испитивања су вршена на челику у раствору 1М HCl. Електрохемијским методама (спектроскопијом електрохемијске импеданције и поларизационим мерењима) оптимизована је концентрација инхибитора са аспекта ефикасности инхибиције и одређен допринос појединих фитохемикалија у заштити од корозије. Теоријским прорачунима је предвиђен механизам адсорпције, док су

фотоелектронском спектроскопијом X-зрака потврђени присуство и састав инхибиторског филма на челику.

Дат је и осврт на испитивање лекова којима је истекао рок трајања, као материјалу чије активне супстанце могу да се користе као потенцијални инхибитори корозије. Предложена су и могућа будућа побољшања.

Резултати и искуства скупљени до сада дају добре смернице за развој нових, еколошки прихватљивих инхибитора за заштиту метала од корозије.

УВОД

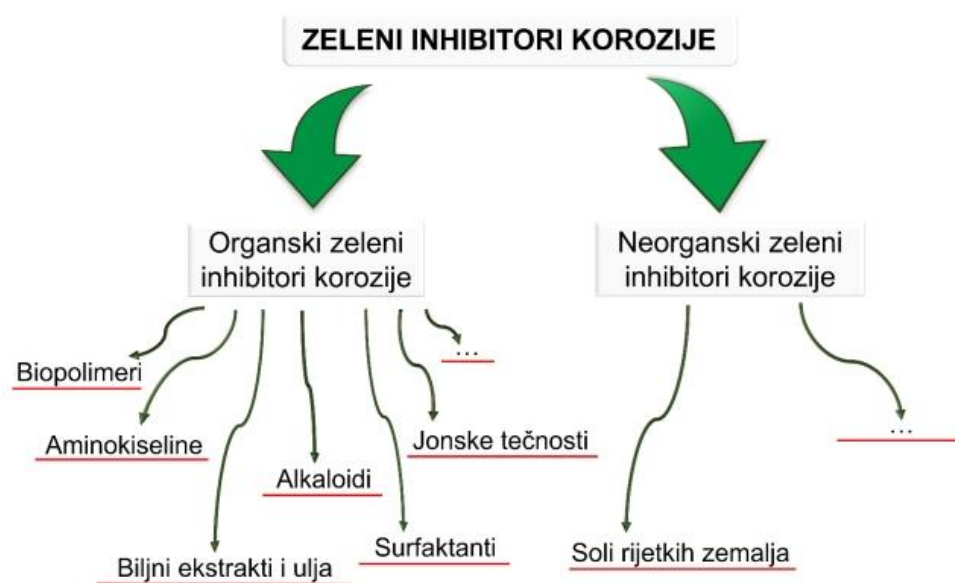
Корозија представља разарање материјала услед утицаја спољашње средине. Сви материјали се временом разграђују, али различитим брзинама, при чему су метали најосетљивији. Због тога се корозија најчешће односи на разарање метала. Име потиче од латинске речи "corrodere", што значи нагризати.

Корозија метала подразумева прелазак метала у стабилније форме, као што су оксиди, хидроксиди или соли. Ова појава се може десити било где, што корозију чини изузетно опасном и скупом, односно, једном од најштетнијих природних појава данас. Процењује се да 3-5% бруто националног дохотка сваке земље иде на поправку штете изазване корозијом или на мере спречавања корозије [1]. Поред значајне материјалне штете, корозија може резултовати и великим губицима у људским животима.

Постоје различити приступи и методе заштите од корозије металних предмета и конструкција, који се могу примењивати током пројектовања и у току њихове употребе, нпр: избор одговарајућих материјала као и одговарајући дизајн; анодна заштита; катодна заштита; наношење превлака (металних, конверзионих, органских...); примена инхибитора [2-4].

Инхибитори корозије су хемијска једињења, органска или неорганска, која се додају у растворе електролита с циљем да смање брзину корозије метала [4-6]. Добри адсорпциони инхибитори се за површину метала везују преко неког хетероатома (нпр. O, S, N). У зависности од средине у којој се користе, могу бити инхибитори за киселе и неутралне растворе, инхибитори у гасовитој фази, или оне који се примењују у превлакама. Према механизму деловања, могу се сврстати у адсорпционе (адсорбују се својим активним групама на површину метала формирајући филм који спречава продирање агенса корозије до супстрата), пасивирајуће, преципитационе, као и модификаторе средине (нпр. оне који уклањају кисеоник). Такође, на основу утицаја на парцијалне реакције на електродама, деле се на анодне (који смањују брзину анодне реакције растварања метала), катодне (које смањују брзину катодне реакције) и мешовите инхибиторе (који смањују брзину обе парцијалне реакције). Неки од ефикасних инхибитора су: хромати, молибдати, нитрити, фосфати, хидразин,

калцијум или магнезијум карбонат, бизмут, арсен, антимон, селен. Поједини инхибитори који се примењују за заштиту од корозије су штетни по здравље и животну околину, у синтези других се често јављају штетни споредни производи тако да се све више истраживања на пољу инхибитора посвећује добијању такозваних зелених инхибитора (слика 1). Овај термин обухвата еколошки прихватљиве инхибиторе, односно супстанце које не садрже тешке метале и друга отровна и штетна једињења, обновљиви су и безбедни и имају биокомпатибилност у природи [7-9].



Слика 1. Подела зелених инхибитора корозије [14]

У зелене инхибиторе спадају на пример екстракти биљака, аминокиселине, алкалоиди, полифеноли, соли лантаноида као и јонске течности [10-13] (слика 1).

Већина зелених инхибитора припада класи мешовитих инхибитора који истовремено инхибирају и анодну и катодну реакцију.

Последњих година наша истраживања су базирана на испитивању разних врста зелених инхибитора на челику у киселој средини и на алуминијуму у неутралној средини, од којих ће бити приказани поједини примери.

РЕЗУЛТАТИ

Етарско уље Панчићеве оморике је добијено из иглица четинара хидродестилацијом. Хемијска анализа је показала да се састоји од 50 једињења, од који већина има ароматичне прстенове. Услед незасићености све фитохемикалије имају места богата π електронским системима, што је један од предуслова за адсорпцију на површину метала.

Испитивањем састава етеричног уља црног бора препознато је педесет и два једињења, али само четири од њих су заступљена са садржајем већим од 2%, што чини 88.3% укупног састава уља (66.5% α -пинен, 2.1% β -пинен, 5.6% кариофилен и 14.0% гермакрен). Електрохемијским методама су тестирани етарско уље црног бора и његове четири активне компоненте (α -пинен, β -пинен, гермакрен и кариофилен), као и етарско уље Панчићеве оморике. Добијени резултати приказани у овим истраживањима потврђују да се све ове групе еколошких инхибитора могу користити као ефикасни инхибитори корозије угљеничног челика у раствору 1 М НСl у процесима киселог чишћења челика у индустријама. Резултати импедансних мерења за све тестиране инхибиторе су показали да су отпорности инхибираних узорак преко десет пута веће у поређењу са неинхибираним узорком челика. Такође, запажено је да импеданса (отпорност) инхибираних узорак расте са временом деловања НСl (од 1 до 4 h), услед постизања веће покривености површине челика, као и веће компактности инхибиторског филма на угљеничном челику. Ефикасност инхибиције расте са порастом концентрације до појаве критичне концентрације, када почиње да се смањује вероватно услед стерних сметњи.

Фитохемикалија α -пинен у концентрацији у којој се природно налази у уљу (66,5 ppm) је показала сличну ефикасност као 100 ppm уља. Са друге стране, β -пинен и кариофилен у концентрацијама у којима се налазе у уљу немају значајан допринос у инхибицији корозије. Ефикасност доминантних компоненти (фитохемикалија) црног бора је упоређена са ефикасношћу самог етарског уља при истим концентрацијама (80 ppm) и добијени резултати показују да се након 4 h анализе ефикасност тестираних инхибитора повећава следећим редом: β -пинен < α -пинен < етарско уље црног бора < кариофилен. Другим речима, прави потенцијал фитохемикалије показују када се анализирају исте концентрације свих једињења, што даје смернице за синтезу ефикасних инхибитора.

Поларизациона мерења су показала да су етарска уља црног бора и Панчићеве оморике, као и фитохемикалије инхибитори мешовитог типа са већим утицајем на смањење катодне густине струје. Етарска уља Панчићеве оморике и црног бора показала су ефикасност инхибиције већу од 90%, као и већина испитиваних фитохемикалија.

Угао квашења је већи код инхибированих него код неинхибираног узорка, што указује на постојање површинског слоја на металу који је састављен од активних, органских супстанци. Повећање угла квашења инхибиране челичне електроде после 4 h у односу на угао квашења инхибираног челика након 1 h потапања је такође још једна потврда о порасту ефикасности зелене смеше током времена. На површини метала се формира хидрофобни филм, сачињен од фитохемикалија из етарског уља, који повећава корозиону отпорност током 4 h.

Фотоелектронском спектроскопијом X-зрака (XPS) утврђено је постојање C-C/C=C веза, што одговара цикличним и ароматичним прстеновима, као и C-O- и C=O група, које потичу од фитохемикалија које у структури имају кисеоник. Овим мерењима је потврђена адсорпција преко активних група и формирање заштитног филма састављеног од фитохемикалија из Панчићеве оморице [14]. Механизам везивања активних група за површину челика је описан теоријским прорачунима [14] и показано је да се неке фитохемикалије везују за површину челика хемисорпцијом (борнил-ацетат и борнеол) а друге физисорпцијом (камфен).

Наша истраживања значајно доприносе разумевању механизма инхибиције корозије применом етарских уља четинара и њихових фитохемикалија, пружајући основу за дизајнирање и развој ефикасних инхибитора за заштиту угњеничног челика. Поред тога, детаљна испитивања молекулских интеракција инхибитора и односа њихове структуре и активности су добро полазиште за унапређење развоја нових инхибитора и оптимизацију њихове ефикасности.

Добијени подаци о инхибиторској активности свих испитиваних фитохемикалија упућују на могућност њиховог изоловања из биљака ради добијања ефикасних инхибитора, или на добијање синтезом у лабораторији. Такође, употреба етарских уља биљака које у свом саставу садрже веће количине фитохемикалија као што су кариофилен, α -пинен, борнил-ацетат и борнеол може бити добар избор за инхибиторе корозије.

МОГУЋИ ПРАВЦИ РАЗВОЈА НОВИХ ИНХИБИТОРА

Лекови су нетоксични, јефтини и занемарљиви су њихови негативни утицаји на животну средину и стога се користе као замена традиционалних токсичних инхибитора корозије. Избор неких лекова који се користе као инхибитори корозије заснован је на следећим чињеницама: еколошки су прихватљиви и важни у биолошким реакцијама, молекули многих лекова садрже азот, сумпор и/или кисеоник као активне центре, лако се производе и пречишћавају [15]. Присуство карбоцикличних и хетероцикличних система, петочланих и шесточланих ароматичних прстенова код комерцијалних лекова

привукло је пажњу многих истраживача као потенцијални извор зелених инхибитора корозије. Разни лекови су испитани као инхибитори корозије на челику, алуминијуму, бакру, цинку и гвожђу у различитим киселим и алкалним срединама [16], као на пример антибиотици, аналгетици, витамини....

У Србији данас практично нема сектора у фабрикама које се баве истраживањем и развојем нових инхибитора корозије. Најчешће се користе готове, углавном увезене технологије. Знање и искуство истраживача у разним институцијама у земљи који се баве инхибиторима корозије (на пример: Технолошко-металуршки факултет у Београду, Институт за хемију, технологију и металургију у Београду, Природно-математички факултет у Новом Саду) пружају могућност повезивања индустрије и ових институција. Један од праваца развоја нових еколошки прихватљивих биљака су и лекови којима је истекао рок трајања, као и синтеза инхибитора из биљака.

ЗАХВАЛНИЦА

Овај рад је финансијски подржало Министарство науке, технолошког развоја и иновације Републике Србије (Пројекти бр: 451-03-65/2024-03/200135, 451-03-66/2024-03/200026)

РЕФЕРЕНЦЕ

1. Palou, R. M., Olivares-Xomelt O., Likhanova N. V., Developments in corrosion protection, (Ed. M. Aliofkhazraei), InTech, 2014, pp. 431–465.
2. Zaki, A., Principles of corrosion engineering and corrosion control, Butterworth-Heinemann, Oxford, 2006
3. Roberge, P.R., Corrosion Inspection and Monitoring, John Wiley and Sons Inc., New York, 2007
4. Гргур, Б.Н., Корозија и заштита, Технолошко-металуршки факултет, Београд, 2019
5. P. Pedferri, Corrosion Science and Engineering, Springer, Milan, 2018
6. Dariva, C.G., Galio, A.F., Corrosion inhibitors: Principles, mechanisms and applications, in: Developments in Corrosion Protection (Ed. M.Aliofkhazrei) Ebook (2014) pp. 365-379
7. Kesavan D, Gopiraman M, Sulochana N, Green Inhibitors for Corrosion of Metals : A Review Correspondence :, Chem. Sci. Rev. Lett. (2012), 1, pp. 1–8
8. Rani B.E.A, Basu B.B.J, Green inhibitors for corrosion protection of metals and alloys: An overview, Int. J. Corros. 2012 (2012), pp. 1–15
9. Khan G, Newaz K.M.S, Basirun W.J, Ali H.B.M, Faraj F.L, Khan G.M, Application of natural product extracts as green corrosion inhibitors for metals and alloys in acid pickling processes- A review, Int. J. Electrochem. Sci. 10 (2015), pp. 6120–6134.

10. Sanyal B, Organic compounds as corrosion inhibitors in different environments—a review, *Prog. Org. Coatings*, 9 (1981), pp. 165–236
11. Radojčić I, Berković K, Kovač S, Vorkapić-Furač J, Natural honey and black radish juice as tin corrosion inhibitors, *Corros. Sci.* 50 (2008), pp. 1498–1504
12. Gupta D.K, Green Inhibitors for Prevention of Metal and Alloys Corrosion : An Overview, 3 (2013), pp. 16–24
13. Bereket G, Yurt A, The inhibition effect of amino acids and hydroxy carboxylic acids on pitting corrosion of aluminum alloy 7075, *Corros. Sci.* 43 (2001), pp. 1179–1195
14. Симовић, А. Р, Инхибиторско дејство деривата органских киселина и екстракта биљака као еколошки прихватљивих инхибитора корозије метала, докторска дисертација, Београд, Србија, 2024
15. Eddy N.O, Odoemelam S, Mbaba J, Inhibition of the corrosion of mild steel in HCl by sparfloxacin, *Pure Appl. Chem.* 2 (2008), pp 132–138.
16. Pathak R.K, Mishra P, Drugs as Corrosion Inhibitors: A Review, *Int. J. Sci. Res.* 5 (2016), pp 671–677