

## Универзитет у Београду – Хемијски факултет

### Наставно–научно веће

**Предмет:** Извештај Комисије за оцену докторске дисертације **Михајла В. Јакановског**, мастер хемичара, студента докторских студија Хемијског факултета.

На редовној седници Наставно–научног већа Хемијског факултета одржаној 11. јуна 2026. године изабрани смо у Комисију за оцену докторске дисертације **Михајла В. Јакановског**, мастер хемичара, студента докторских студија Хемијског факултета под насловом:

#### **„Шећери и органске киселине као показатељи аутентичности меда“**

Пошто смо поднели дисертацију прегледали, подносимо следећи

### ИЗВЕШТАЈ

#### **А. Приказ садржаја дисертације**

Докторска дисертација кандидата **Михајла В. Јакановског** написана је на српском језику, на 169 страна А4 формата (фонт Times New Roman величине 12 pt, са проредом 1, маргинама 2 cm) и садржи 77 слика, 17 табела и 186 литературних навода. Дисертација се састоји из 7 поглавља: Увод (2 стране), Општи део (39 страна), Експериментални део (13 страна), Резултати и дискусија (61 страна), Закључак (3 стране), Литература (10 страна), Прилог (41 страна). Поред тога, дисертација садржи: Захвалницу на српском језику, Изводе на енглеском и српском језику, Садржај, Биографију кандидата на српском језику, Списак објављених радова, Изјаву о ауторству, Изјаву о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада и Изјаву о коришћењу. Дисертација је по својој структури и садржају у потпуности у складу са стандардима прописаним од стране Универзитета у Београду.

У поглављу **Увод** дефинисани су предмет и основни циљеви истраживања ове докторске дисертације. Наглашен је значај поуздане оцене аутентичности меда, односно проблем кривотворења меда на глобалном тржишту, превасходно додавањем јефтинијих шећерних сирупа, што услед његове високе комерцијалне вредности представља значајан економски и аналитички изазов. Кандидат истиче да традиционалне методе контроле квалитета, укључујући и стандардну методу за анализу стабилних изотопа угљеника (EA-IRMS), имају одређена ограничења, посебно при детекцији додатих шећера пореклом од C3 (Це3) биљака. Као одговор на ове изазове, јасно је постављен главни циљ дисертације: развој и примена напредних хроматографских техника (HPLC-PAD, HPTLC, IC-CD) у комбинацији са статистичким методама, ради идентификације специфичних шећера и органских киселина као хемијских маркера одређене биљне врсте меда. Истакнута је намера да се добијени хроматографски подаци интегришу са класичним физичко–хемијским параметрима и односима стабилних изотопа угљеника, чиме се ствара свеобухватан мултикомпонентни аналитички оквир за прецизну диференцијацију биљног порекла меда и потврду његове аутентичности.

У оквиру поглавља **Општи део** дат је систематичан и опсежан преглед релевантне литературе, који је подељен у четири кључне тематске целине. У првом делу детаљно је обрађен хемијски састав меда, са посебним акцентом на доминантне компоненте, као и на мање заступљене састојке попут органских киселина, протеина и ензима, који значајно утичу на физичко–хемијска и сензорска својства меда. Кандидат разматра сложену проблематику

дефинисања биљног и географског порекла меда, истичући како састав флоре и климатске одлике поднебља дефинишу специфичан хемијски „отисак прста“ и нутритивну, биолошку и комерцијалну вредност сваке појединачне биљне врсте меда. Друга целина посвећена је изазовима у контроли квалитета и аутентичности меда. С обзиром на то да је мед производ изузетне нутритивне, биолошке и, последично, економске вредности, у раду је детаљно описан проблем његовог честог кривотворења на глобалном тржишту. Посебна пажња посвећена је често коришћеним методама кривотворења, превасходно употребом различитих егзогених шећерних сирупа (инвертних сирупа, као и сирупа пореклом од С3 и С4 биљака) који се користе ради имитирања природног угљенохидратног профила меда и заобилажења постојећих аналитичких и регулаторних механизма контроле аутентичности. У трећем делу дат је преглед савремених аналитичких метода које се користе за контролу аутентичности меда. Кандидат описује различите инструменталне технике почев од напредних хроматографских (HPLC, HPAEC–PAD, HPTLC, GC), преко спектроскопских (NMR) до софистицираних изотопских и ДНК анализа. За сваку од наведених техника образложени су принципи рада и њихов специфичан допринос, предности и ограничења у контроли аутентичности и детекцији кривотворења меда. Последњи део овог поглавља обухвата теоријске основе валидације аналитичких метода, која је неопходна за потврду поузданости и тачности резултата анализе. Такође, описани су статистички алати за обраду података примењени у дисертацији (анализа главних компонената, PCA, и парцијална регресија најмањих квадрата са дискриминантном анализом, PLS–DA), који омогућавају интеграцију сложених матрица података у циљу формирања предиктивних модела за потврду биљног порекла и аутентичности меда.

У поглављу **Експериментални део**, кандидат даје детаљан опис прикупљених узорака меда, као и реагенаса и материјала коришћених током израде тезе. Затим су изложене процедуре мелизопалинолошке анализе и стандардних метода за одређивање основних физичко–хемијских параметара квалитета меда. Део овог поглавља посвећен је опису експерименталних услова за одређивање односа стабилних изотопа угљеника. Кандидат детаљно описује поступке оптимизације хроматографских услова, валидације метода и анализе профила шећера (укључујући и квалитативну анализу применом високоефикасне танкослојне хроматографије – HPTLC), као и оптимизацију и валидацију анализе профила органских киселина. На крају поглавља описане су статистичке методе и софтверски алати коришћени за мултиваријантну обраду, визуализацију и интерпретацију добијених резултата. Поголавље **Резултати и дискусија** садржи логично повезане целине у којима су детаљно представљени и критички продискутовани добијени резултати. Први део овог поглавља обухвата резултате мелизопалинолошке анализе и одређивања основних физичко–хемијских параметара квалитета, који су потврдили аутентичност испитиваних узорака. Поред тога, приказан је дискриминаторни потенцијал поменутих параметара у процени биљног порекла меда. У оквиру ове целине приказани су и резултати студије стабилности багремовог меда током дванаестомесечног складиштења.

У наставку су представљени резултати EA–IRMS анализе односа стабилних изотопа угљеника, која је омогућила процену присуства шећера пореклом од С4 биљака и издвајање скупа узорака који су коришћени као аутентични у даљим фазама истраживања. С обзиром на то да идентификација додатка С3 сирупа у мед остаје аналитички изазов, дискутована је неопходност примене комплементарних аналитичких приступа за оцену аутентичности меда. У том циљу представљени су резултати оптимизације и валидације HPAEC–PAD методе, која је омогућила поуздано раздвајање 11 шећера уз високу осетљивост и ниске границе детекције. Показано је да специфични шећери, попут трехалозе, мелибиозе и рафинозе за медљиковац, односно сахарозе, малтозе и ерлозе за багремов мед, представљају значајне маркере биљног порекла меда.

Додатно је дискутована примена високоефикасне танкослојне хроматографије (НРТЛС) као скрининг методе за детекцију карактеристичних образаца олигосахарида присутних у шећерним сирупима. Ова метода се показала као кључна комплементарна техника у случајевима када ЕА–ИРМС анализа даје граничне резултате или када није могуће изоловати протеин из меда за изотопску анализу. Наредна целина обухвата резултате одређивања профила органских киселина применом развијене и валидоване методе јонске хроматографије са кондуктометријском детекцијом (IC–CD). Дискутована је идентификација кининске, јабучне, ћилибарне, лимунске, малеинске и изолимунске киселине као кључних маркера за поуздану диференцијацију медљиковца од нектарских врста меда. Посебан акценат стављен је на детекцију кривотворења багремовог меда применом инвертних сирупа, где је показано да праћење повишених концентрација лимунске киселине и присуства изолимунске киселине представља поуздан приступ у процени аутентичности производа. У последњем делу овог поглавља приказани су резултати мултиваријантне статистичке анализе добијених резултата (PCA и PLS–DA). Интеграцијом свих аналитичких показатеља постигнута је поуздана класификација меда према биљном пореклу, при чему су развијени модели омогућили јасно раздвајање багремовог меда и медљиковца, са највећом дискриминационом моћи и без мискласификације тестираних узорака. Добијени резултати показали су да ниједна појединачна група анализата не може обезбедити потпуну класификацију, већ да се највећа поузданост постиже интеграцијом комплементарних хемијских маркера.

У поглављу **Закључак** сумирани су и прокоментарисани резултати добијени у оквиру докторске дисертације, при чему је јасно дефинисан допринос сваке од развијених метода успостављању новог приступа у контроли аутентичности меда.

Наведена **Литература** (186 цитата) обухвата радове/књиге из области истраживања и покрива све делове дисертације.

У **Прилогу** су дати комплетни резултати анализе физичко–хемијских параметара, студије стабилности багремовог меда, односа стабилних изотопа угљеника, као и резултати валидације развијених метода и комплетни профили шећера и органских киселина одређени у оквиру истраживања описаних у поглављу Резултати и дискусија.

## **Б. Кратак опис постигнутих резултата**

У оквиру ове докторске дисертације спроведена је систематична евалуација параметара аутентичности меда уз развој, оптимизацију и примену напредних аналитичких техника. Развијене су и оптимизоване хроматографске методе високе осетљивости и ефикасности: високоефикасна анјонскоизмењивачка хроматографија са пулсном амперометријском детекцијом (НРАЕС–РАD) омогућила је потпуно раздвајање 11 шећера за свега 35 минута, док је оптимизована IC–CD метода обезбедила прецизну квантификацију девет органских киселина без потребе за сложенем припремом узорака. Додатно, спроведена је дванаестомесечна студија стабилности багремовог меда која је потврдила да до статистички значајног пораста садржаја хидоксиметилфурфурала, смањења активности дијастазе и пораста слободне киселости меда долази са продужењем времена складиштења, чак и у одсуству термичког третмана.

Кандидат је применио стандардну ЕА–ИРМС методу за процену аутентичности меда на основу односа стабилних изотопа угљеника, а добијени резултати искоришћени су за формирање скупа аутентичних узорака за даља испитивања.

Као један од посебно значајнијих резултата истиче се примена НРТЛС методе као брзог и релативно једноставног визуелног скрининг алата, којом се могу превазићи ограничења стандардне ЕА–ИРМС методе. Наиме, одређивањем НРТЛС профила шећера у меду

идентификовани су карактеристични олигосахаридни обрасци шећерних сирупа у сумњивим узорцима, посебно онима из којих није било могуће изоловати протеин, чиме је потврђена вредност високоефикасне танкослојне хроматографије као комплементарне аналитичке технике за оцену аутентичности меда.

На основу добијених резултата идентификовани су специфични угљени хидрати - трехалоза, рафиноза и мелибиоза за медљиковац, односно ерлоза за багремов мед, и органске киселине - кининска, јабучна и малеинска, као кључни маркери биљног порекла меда. Такође, утврђено је да присуство изолимуњске киселине и повишене концентрације лимунске киселине могу представљати поуздане аналитичке маркере кривотворења багремовог меда инвертним сирупом и предложен је гранични садржај лимунске киселине у багремовом меду. Интеграцијом свих физичко-хемијских, изотопских и хроматографских података развијен је PLS-DA модел који је омогућио поуздану класификацију испитиваних врста меда према биљном пореклу, практично без погрешне класификације за багремов мед и медљиковац.

## **В. Компаративна анализа резултата кандидата са резултатима из литературе**

У доступној литератури постоји велики број радова који се баве контролом квалитета и аутентичности меда, али они најчешће укључују појединачне аналитичке методе или праћење ограничених група анализата. Иако ЕА-IRMS представља широко прихваћену стандардну методу за детекцију додатка С4 шећера у мед, досадашња истраживања ретко комбинују ову технику са високорезолутивним хроматографским профилисањем у циљу превазилажења ограничења изотопске анализе и поузданије детекције додатка шећерних сирупа пореклом од С3 биљака.

Научни допринос ове дисертације огледа се у примени интегрисаног приступа који обједињује више комплементарних аналитичких техника и омогућава превазилажење ограничења појединачних метода. Посебан допринос односи се на разрешавање аналитичких дилема у тумачењу резултата изотопске анализе меда.

Иако се према стандардној ЕА-IRMS методи негативна вредност за садржај С4 шећера приказује као 0%, разлика у односима  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  између меда и из њега изолованог протеина већа од 1‰ захтева додатну проверу аутентичности због сумње на додатак шећера пореклом од С3 биљака. Док поједини аутори сугеришу да узорке са израчунатим садржајем С4 шећера мањим од -7% *a priori* треба сматрати неаутентичним, НРТLC анализа спроведена у оквиру ове докторске дисертације показала је одсуство олигосахаридних маркера испитиваних шећерних сирупа у таквим узорцима. Ови резултати указују на ограничења примене прага од -7% С4 шећера као недвосмисленог критеријума за процену аутентичности меда и указује на потребу за интеграцијом комплементарних аналитичких техника ради поузданије идентификације кривотворених узорака..

За разлику од досадашњих студија које се ослањају на сложене поступке дериватизације или веома скупе инструменталне технике, оптимизоване НРАЕС-PAD и IC-CD методе развијене у оквиру ове дисертације представљају бржу, флексибилнију и економичнију алтернативу. Постигнуте границе детекције и квантификације у потпуности су упоредиве, а у појединим сегментима и супериорније у односу на неке сложеније аналитичке поступке, што ове методе чини погодним за рутинску лабораторијску анализу аутентичности меда. Поред тога, примена оваквог приступа у комбинацији са мултиваријантним статистичким методама (РСА и PLS-DA) омогућила је потпуно раздвајање узорака багремовог меда и медљиковца у класификационим моделима што представља значајан допринос оцени аутентичности ових економски значајних врста меда.

## **Г. Научни радови објављени у међународним часописима и саопштења са скупова који су део докторске дисертације**

Резултати испитивања у оквиру ове докторске дисертације до сада су објављени у оквиру два научна рада. Један рад је штампан у водећем међународном часопису категорије M21, а један рад у међународном часопису категорије M22. Поред тога, део резулта је презентован у облику једног саопштења на научном скупу националног значаја штампаног у изводу.

### **Радови публиковани у водећем међународном часопису категорије M21**

1. Mihajlo V. Jakanovski, Nikola M. Horvacki, Aleksandra M. Dramićanin, Aleksandra D. Radoičić, Sandra B. Šegan, Dušanka M. Milojković–Opsenica (2025), *Organic acids as promising authenticity markers of Robinia pseudoacacia honey*, Journal of Food Composition and Analysis, 148 (3) 108384, <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2025.108384>

### **Радови публиковани у међународном часопису категорије M22**

1. Mihajlo V. Jakanovski, Đurđa D. Krstić, Aleksandra V. Pavlović, Jelena Đ. Trifković, Petar M. Ristivojević, Dušanka M. Milojković–Opsenica (2026), *Tracing honey production authenticity: comparative performance evaluation of HPTLC, EA–IRMS, and HPAEC–PAD techniques*, European Food Research and Technology, 252, 231, <https://doi.org/10.1007/s00217-026-05162-0>

### **Саопштење на скупу националног значаја штампано у изводу M64**

1. Mihajlo V. Jakanovski, Nikola M. Horvacki, Dušanka M. Milojković–Opsenica, *Validation and optimization of ion chromatography based method for citric acid determination in Robinia pseudoacacia honey*, 9. Konferencija mladih hemičara Srbije, Novi Sad, 4. novembar 2023, Book of Abstracts P–20.

## **Д. Провера оригиналности докторске дисертације**

Оригиналност ове докторске дисертације је проверена на начин прописан Правилником о поступку провере оригиналности докторских дисертација које се бране на Универзитету у Београду (Гласник Универзитета у Београду, бр. 204/22.06.2018). Помоћу програма iThenticate утврђено је да подударање текста износи 9% и то за три од 191 извора појединачно износи 1%, а за остале је мање од 1%. Подударност од 1% утврђена је са докторским дисертацијама Весне Васић „Корелација физичко-хемијских параметара и фитохемијског профила медљиковаца са њиховим биљним пореклом“, Универзитет у Београду – Хемијски факултет, 2020, и Ђуре Крстић „Метаболомичка процена аутентичности семена самониклог и гајеног воћа“, Универзитет у Београду – Хемијски факултет, 2023, и са радом Yingqi Mu, Yixuan Wu, Xiao Wang, Liming Hu, Runhui Ke, Determination of 10 organic acids in alcoholic products by ion chromatography-tandem mass spectrometry [Article in Chinese], Se Pu (Chinese Journal of Chromatography), 2022, 40(12):1128-1135; doi: 10.3724/SP.J.1123.2022.01020. Утврђене подударности могу се описати као: последица цитата, личних имена, афилијација, назива једињења и скраћеница, назива коришћених материјала и метода и њиховог начина извођења, тзв. општих места и података, као и претходно публикованих резултата истраживања докторанда која су проистекла из његове дисертације, што је у складу са чланом 9. Правилника.

На основу свега изложеног Комисија сматра да је докторска дисертација Михајла В. Јакановског оригинална, као и да су у потпуности поштована академска правила цитирања, те се прописани поступак припреме за њену одбрану може наставити.

## **Е. Закључак**

На основу свега изложеног може се закључити да је у поднетој дисертацији под насловом „Шећери и органске киселине као показатељи аутентичности меда“ кандидат, мастер

хемичар Михајло В. Јакановски, успешно одговорио на све постављене задатке који се тичу развоја мултикомпонентног аналитичког приступа за одређивање профила шећера и органских киселина и њихову примену у контроли квалитета и аутентичности меда. Комисија сматра да резултати објављени у оквиру ове докторске дисертације представљају значајан и оригиналан научни допринос развоју и оптимизацији аналитичких поступака за поуздану диференцијацију меда према биљном пореклу и детекцију кривотворења меда додавањем шећерних сирупа. Додатна вредност добијених резултата огледа се у могућности примене методологије развијене у оквиру ове дисертације у рутинској лабораторијској пракси, као и у унапређењу регулаторних протокола за контролу аутентичности меда.

Резултати испитивања у оквиру ове докторске дисертације до сада су објављени у оквиру два научна рада од којих је један рад штампан у часопису категорије M21, а један рад у међународном часопису категорије M22. Поред тога, део резултата је објављен у облику једног саопштења на научном скупу националног значаја штампаног у изводу.

На основу свега изложеног Комисија сматра да се ова дисертација уклапа у савремене трендове аналитичке хемије и хемије хране, те на основу свега изложеног предлаже Наставно–научном већу Универзитета у Београду – Хемијског факултета да прихвати поднету докторску дисертацију Михајла В. Јакановског под насловом **„Шећери и органске киселине као показатељи аутентичности меда“** и одобри њену одбрану.

У Београду, 27. 7. 2026.

Комисија:

**Др Јелена Трифковић**, редовни професор,  
Универзитет у Београду – Хемијски факултет

**Др Душанка Милојковић–Опсеница**, редовни професор,  
Универзитет у Београду – Хемијски факултет

**Др Сандра Шеган**, научни саветник,  
Институт за хемију, технологију и металургију, Институт од националног значаја за  
Републику Србију, Универзитет у Београду

**Др Дражен Лушић**, редовни професор,  
Медицински факултет Универзитета у Риједи

**Др Иванка Ћирић**, виши научни сарадник,  
Иновациони центар Хемијског факултета у Београду