

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
ПОЉОПРИВРЕДНИ ФАКУЛТЕТ

Спасоје Д. Белошевић

**ДОБИЈАЊЕ И ИНКАПСУЛАЦИЈА СОКА ОД
МИКРОБИЉА ОДАБРАНИХ БИЉНИХ
ВРСТА**

докторска дисертација

Београд, 2025

UNIVERSITY OF BELGRADE
FACULTY OF AGRICULTURE

Spasoje D. Belošević

**PRODUCTION AND ENCAPSULATION OF
MICROGREENS JUICES OF SELECTED
PLANT SPECIES**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2025

Ментор:

др Виктор А. Недовић, редовни професор

Универзитет у Београду – Пољопривредни факултет

Комисија:

др Стева М. Левић, ванредни професор

Универзитет у Београду – Пољопривредни факултет

др Миле С. Вељовић, доцент

Универзитет у Београду – Пољопривредни факултет

др Ђорђе Ж. Моравчевић, редовни професор

Универзитет у Београду – Пољопривредни факултет

др Данијел Д. Милинчић, виши научни сарадник

Универзитет у Београду – Пољопривредни факултет

др Верица Б. Ђорђевић, доцент

Универзитет у Београду – Технолошко-металуршки факултет

Датум одбране докторске дисертације:_____

Благодарност

Највећу захвалност и благодарност за све у свом животу изражавам Господу Богу, Исусу Христу, пре свега за живот, затим за своју породицу, ближње и све драге људе који су ми били извор радости у различитим животним околностима. На крају сам захвалан и за све добре и лоше ствари које су ми се догодиле у животу, знајући да су сва добра и успеси плод Милости Божије, а да је све што је било лоше моја кривица. Хвала ти Господе и слава Ти!

Најсрдачније се захваљујем свом ментору, др Виктору Недовићу, редовном професору Пољопривредног факултета Универзитета у Београду, човеку широких схватања, изузетном научнику и добром човеку, на указаном поверењу и пруженој прилици да будем члан његовог изузетног тима. Захваљујем се и на указаној помоћи и великом доприносу у реализацији ове докторске дисертације, почевши од саме идеје, преко експерименталног дела и, на крају, писања докторске дисертације. Такође, захваљујем се на подршци, многобројним корисним саветима и на целокупном ангажовању током свих фаза рада на овој докторској дисертацији.

Неизмерну захвалност дугујем др Стеви Левићу, ванредном професору Пољопривредног факултета Универзитета у Београду, како за идеју, тако и за реализацију ове докторске дисертације. Велико хвала на изузетној помоћи приликом експерименталног дела, писања радова, анализи, тумачењу и интерпретацији резултата, решавању проблема и неизрецивој подршци током целокупног студирања.

Посебну захвалност дугујем др Верици Ђорђевић, доценту Технолошко-металуришког факултета Универзитета у Београду, на великој помоћи, подршци, сарадњи, пријатељским разговорима и увек присутној помоћи током свих фаза ове дисертације. Такође, посебно сам захвалан на могућности да један део експерименталног дела ове дисертације буде реализован у лабораторији Технолошко-металуришког факултета.

Велику захвалност на драгоценим саветима и помоћи дугујем др Ђорђу Моравчевићу, редовном професору Пољопривредног факултета Универзитета у Београду.

Захваљујем се др Милету Вељовићу, доценту Пољопривредног факултета, Универзитета у Београду, на помоћи, подршци и корисним саветима током рада на реализацији ове дисертације.

Захваљујем се др Јелени Миочиновић, редовном професору Пољопривредног факултета Универзитета у Београду, на великој помоћи и саветима током реализације ове дисертације. Хвала пуно и др Марини Ховјецки, др Мири Радовановић и поштованој Данијели Грујић на помоћу пруженој током експерименталног дела ове дисертације.

Посебну захвалност дугујем колеги др Данијелу Милинчићу, вишем научном сараднику Пољопривредног факултета Универзитета у Београду, на изузетној подршци и помоћи приликом извођења ове докторске дисертације. Хвала на корисним саветима, преносу знања, дугим пријатељским разговорима, и помоћи приликом писања радова.

Захваљујем се др Мирјани Пешић, редовном професору Пољопривредног факултета Универзитета у Београду, на пруженој помоћи током извођења експеримената у оквиру ове докторске дисертације и писању научних радова. Захваљујем се и др Александру Костићу, ванредном професору Пољопривредног факултета Универзитета у Београду, др Урошу Гашићу, научном саветнику Института за Биолошка истраживања „Синиша Станковић“ (IBISS) и др Владимиру Павловићу, редовном професору Пољопривредног факултета Универзитета у Београду, на великој помоћи приликом извођења експеримената, анализа и писања научних радова. Хвала на свему, без ваших доприноса ова дисертација не би била потпуна.

Неизмерно се захваљујем колегиници др Јовани Марковић, истраживачу сараднику Пољопривредног факултета Универзитета у Београду, на пруженој помоћи током свих фаза израде ове докторске дисертације, од почетка експерименталног дела па све до писања дисертације. Велико хвала на увек присутној подршци, давању ветра у леђа, добронамерним саветима, корисним пријатељским разговорима и пренесеном знању.

Велику захвалност дугујем колегиници др Ани Салевић, асистенту Пољопривредног факултета Универзитета у Београду, на пруженој помоћи и великој подршци приликом свих фаза израде ове дисертације. Посебно хвала на несебичној помоћи у писању радова, тумачењу резултата и давању корисних савета и сугестија.

Колегиници Ани Тодоровић, истраживачу сараднику Пољопривредног факултета Универзитета у Београду, дугујем велику захвалност приликом писања ове докторске дисертације. Хвала пуно, твоји савети и добронамерне сугестије су увек били од користи.

Поштованом колеги и пријатељу Стефану Марјановићу, истраживачу сараднику Пољопривредног факултета Универзитета у Београду, дугујем велику захвалност на подршци и помоћи приликом израде ове дисертације. Бескрајно хвала на корисним и добронамерним пријатељским разговорима и саветима који су ми помогли да превазиђем бројне препреке у животу и на пољу академског образовања. Такође, хвала драгим професорима и колегама са Радмиловца, где сам и написао део докторске дисертације и научних радова.

Велико хвала др Љубомиру Животићу, доценту Пољопривредног факултета Универзитета у Београда, на пруженој подршци током израде ове дисертације.

Захваљујем се свим колегама из лабораторије Катедре за технологију конзервисања и врења, као и колегама из лабораторије Катедре за хемију и биохемију на пруженој подршци, дружењу и емпатији.

Велику захвалност дугујем Министарству науке, технолошког развоја и иновација Републике Србије на пруженој помоћи у виду стипендирања и укључивања у рад на факултету.

Захваљујем се господину Мирославу Милуновићу, власнику компаније Plantica и његовој породици на дарованом микробиљу, без којег ова дисертација не би била комплетна.

Искрено хвала својој драгој фамилији и пријатељима на подршци и разумевању током мог целокупног академског образовања.

Највећу захвалност упућујем својој породици, на пруженој љубави, подршци и поверењу. Велико хвала оцу Дејану на огромној подршци, бодрењу и великој љубави коју ми је пружио током одрастања и целокупног академског образовања, као и приликом израде ове докторске дисертације. Такође, хвала сестри Јелени и брату Стефану на неизрецивој подршци, разумевању и несебичној љубави. Драгој Викторији хвала на љубави, поверењу и подршци коју ми пружа.

Не смем да заборавим ни оне који су нас довели на овај свет, а који су сада на неком бољем месту, а заслужни су за мој живот и развој. Огромну и неизрециву захвалност упућујем својој мајци Драгани, за све што ми је пружила у животу – пре свега за безусловну љубав, неизмерну подршку и безгранично поверење током целокупног мог образовања.

У знак вечног сећања и искрене захвалности мајци Драгани.

Са дубоком захвалношћу оцу Дејану и својој породици.

Ову дисертацију посвећујем вама.

Аутор

*„1. У почетку створи Бог небо и
Земљу.*

*11. Опет рече Бог: Нека пусти земља из
себе траву, биље, што носи семе, и дрво
родно, које рађа род по својим врстама, у
којем ће бити семе његово на земљи.
И би тако.“*

Постање 1-11 (Свето Писмо)

Добијање и инкапсулација сока од микробиља одабраних биљних врста

Сажетак

У оквиру ове докторске дисертације постављено је неколико циљева: а) детаљна карактеризација микробиља амаранта, цвекле и броколија у погледу садржаја биоактивних једињења; б) производња и карактеризација хладно цеђених сокова од микробиља амаранта, цвекле и броколија као функционалних напитака; в) инкапсулација сокова од микробиља наведених врста техником спреј сушења коришћењем малтодекстрина и инулина као носача у циљу добијања функционалних адитива и карактеризација добијених инкапсулата и г) производња и карактеризација јогурта обогаћених инкапсулатима сокова од микробиља амаранта, цвекле и броколија, у циљу добијања потенцијално функционалних производа.

На почетку ове докторске дисертације извршена је карактеризација микробиља амаранта, цвекле и броколија у погледу биоактивних једињења. Резултати детаљне карактеризације микробиља показали су да ова микробиља садрже различита фенолна једињења, беталаине и глукозинолате. У микробиљу амаранта и броколија су најзаступљеније биле фенолне киселине и њихови деривати, док су у микробиљу цвекле били доминантни апигенин С-гликозиди. Беталаини су детектовани у микробиљу цвекле и амаранта, док су глукозинолати пронађени само у микробиљу броколија.

Ова дисертација је обухватила производњу хладно цеђених сокова од горенаведеног микробиља, као и испитивање утицаја процеса хладног цеђења на биоактивне компоненте микробиља и сензорни профил сокова. Доминантно идентификована и квантификована фенолна једињења у свим хладно цеђеним соковима од микробиља биле су фенолне киселине и њихови деривати са органским киселинама (хининска и јабучна киселина). У соку од микробиља амаранта пронађен је висок садржај пентозил хексозида ванилинске киселине и дихидроксibenзоeве киселине, док су у соку од микробиља броколија то били деривати синапинске киселине. У соку од микробиља цвекле су и након цеђења доминантно били присутни апигенин С-гликозиди. У соку од микробиља амаранта потврђено је присуство неколико беталаина, пре свега амарантин и изоамарантин, док су у соку од микробиља цвекле идентификовани бетанин и изобетанин. Сви испитивани сокови од микробиља показали су добра антиоксидативна својства, нарочито у погледу инхибиције ABTS⁺ слободног радикала и редукције фero јона (FRAP метода). Када су у питању физичко-хемијски параметри, сокови од микробиља су имали благу киселост и низак садржај шећера. Сви сокови су показали добар сензорни квалитет и генерално добру сензорну прихватљивост, са укусима карактеристичним за врсте од којих су добијени. Свеукупно, ови хладно цеђени сокови од микробиља представљају богат извор биоактивних компонената и могу се потенцијално сматрати новим функционалним производима – напцима.

Поред добијања сокова од микробиља, у овој дисертацији је такође разматрана могућност инкапсулације хладно цеђених сокова од микробиља ради заштите њихових биоактивних једињења, повећања стабилности и продужења њиховог рока трајања. Сокови су инкапсулирани техником спреј сушења уз коришћење малтодекстрина и инулина као носача. Анализа добијених инкапсулата је укључивала: физичко-хемијску, фитохемијску, морфолошку и структурну карактеризацију, као и анализу антиоксидативних својстава. Испитивања су показала висок принос и ефикасност инкапсулације, као и низак садржај влаге инкапсулата. SEM анализа је показала честице малих димензија са правилном, очуваном микроструктуром и ниском лепљивошћу, док ATR-FTIR анализа указује на потенцијално успешну инкапсулацију активних састојака сокова од микробиља унутар носача. Инкапсулати са инулином су показали више вредности укупних фенолних једињења, флавоноида и беталаина, што је највероватније допринело антиоксидативној активности у поређењу са инкапсулатима са малтодекстрином. Хроматографска анализа је укупно

идентификовала 47 фенолних једињења и 11 беталаина, при чему су деривати фенолних киселина били најзаступљенији у инкапсулатима сока од микробиља амаранта (деривати хидроксициметне киселине) и броколија (синапинска киселина и њени деривати), док су у инкапсулатима сока од микробиља цвекле најзаступљенији били апигенин С-гликозиди (деривати цитозиозида и витексина). Беталаини су доминантно били присутни у инкапсулатима сока од микробиља цвекле и амаранта. Сумарно, инкапсулирани сокови од микробиља су показали повољна својства и јаку антиоксидативну активност, што указује на њихов потенцијал за примену у прехранбеној индустрији као функционалних адитива.

Завршни део ове докторске дисертације се базирао на примени добијених инкапсулата у прехранбеном производу – јогурту. Инкапсулати сокова од микробиља су додати у јогурт и добијени производи су испитани са аспекта: физичко-хемијских и текстуралних параметара, укупног садржаја фенолних једињења, антиоксидативне активности и сензорних својстава. Добијени јогурти обogaћени инкапсулатима сокова од микробиља су показали добра текстурална својства (чврстина, конзистенција, кохезивност и индекс вискозитета), редукован синерезис и атрактивну боју. Сви јогурти обogaћени инкапсулатима имали су већи садржај фенолних једињења и антиоксидативну активност од контролног јогурта. Поред тога, обogaћени јогурти имали су врло добар квалитет и високу укупну прихватљивост од стране потрошача.

Добијени резултати у склопу ове докторске дисертације показују да добијени сокови од микробиља имају разноврстан и висок садржај биоактивних једињења са јаком антиоксидативном активношћу, што их чини потенцијалном функционалном храном. Инкапсулацијом сокова микробиља добијени су инкапсулати повољних физичко-хемијских карактеристика и антиоксидативне активности, а стабилност присутних биоактивних једињења је унапређена. Инкорпорација инкапсулата у јогурт утицала је на побољшање физичко-хемијских, текстуралних и антиоксидативних својстава производа. Добијени инкапсулати од сокова микробиља се могу користити као прехранбени адитиви у прехранбеној индустрији у циљу побољшања функционалне вредности производа.

Кључне речи: микробиље броколија (*Brassica oleracea* var. *italica*), микробиље амаранта (*Amaranthus tricolour* L.), микробиље цвекле (*Beta vulgaris*), сокови од микробиља, инкапсулација, спреј сушење, јогурт, фенолна једињења, беталаини, антиоксидативна активност

Научна област: Технолошко инжењерство

Ужа научна област: Наука о конзервисању и врењу

UDK: 663.813:631.53.03(043.3)

Production and encapsulation of microgreen juices of selected plant species

Abstract

This doctoral dissertation pursued several objectives: (a) detailed characterisation of amaranth, red beet and broccoli microgreens in terms of their bioactive compounds content; (b) production and characterisation of cold-pressed juices from amaranth, red beet and broccoli microgreens as functional beverages; (c) encapsulation of cold-pressed microgreen juices from the above-mentioned species by spray drying within maltodextrin and inulin as carriers with the aim of producing functional additives and characterisation of the obtained encapsulates; and (d) production and characterisation of yoghurts enriched with microgreen juice encapsulates from amaranth, red beet and broccoli with the aim of developing potentially functional foods.

At the beginning of this doctoral thesis, the characterisation of amaranth, red beet and broccoli microgreens with regard to their bioactive components was carried out. The results of the analyses showed that these microgreens contain various phenolic compounds, betalains and glucosinolates. Phenolic acids and their derivatives were predominant in amaranth and broccoli microgreens, while apigenin C-glycosides dominated in red beet microgreens. Betalains were detected in red beet and amaranth microgreens, while glucosinolates were exclusively present in broccoli microgreens.

This dissertation focused on the production of cold-pressed microgreen juices from the above-mentioned microgreens and the evaluation of the effects of the cold-pressing process on their bioactive compounds and sensory profiles. The dominant phenolic compounds identified and quantified in all cold-pressed microgreen juices were phenolic acids aglycones and their derivatives of organic acids, mainly quinic acid and malic acid. High levels of pentosyl hexoside glycosides of vanillic acid and dihydroxybenzoic acid were detected in the juice of amaranth microgreens, while the juice of broccoli microgreens was characterised by derivatives of sinapic acid and their derivatives. Apigenin C-glycosides remained dominant in the juice of red beet microgreens even after pressing. In addition, the presence of several betalains, mainly amaranthin and isoamaranthin, was confirmed in amaranth microgreen juice, while betanin and isobetanin were detected in red beet microgreen juice. All microgreen juices analysed showed good antioxidant activity, especially in terms of ABTS⁺ radical scavenging and ferric ion reducing power (FRAP assay). In terms of physico-chemical properties, the juices had a mild acidity and low sugar content. The sensory evaluation revealed good quality and overall acceptability with flavour profiles characteristic of the respective microgreen types. Overall, these cold-pressed microgreen juices represent a rich source of bioactive compounds and can be considered as potential novel functional beverages.

In addition to the production of microgreen juices, this dissertation also investigated the possibility of encapsulating cold-pressed microgreen juices to protect their bioactive compounds, improve their stability and extend their shelf life. The microgreen juices were encapsulated using a spray-drying technique within maltodextrin and inulin as carriers. The analysis of the obtained encapsulates included the physicochemical, phytochemical, morphological and structural characterisation as well as the evaluation of the antioxidant properties. The results showed a high encapsulation yield and efficiency as well as a low moisture content of the encapsulates. SEM analysis showed small particles with a regular, preserved microstructure and low stickiness, while ATR-FTIR analysis indicated potentially successful entrapment of microgreen juice bioactives within the carriers. Encapsulates formulated with inulin showed higher levels of total phenols, flavonoids and betalains, which probably contributes to their increased antioxidant activity compared to the encapsulates with maltodextrin. Chromatographic analysis identified a total of 47 phenolic compounds and 11 betalains. Phenolic acid derivatives predominated in the amaranth microgreen juice encapsulates (hydroxycinnamic acid derivatives) and broccoli (sinapic acid and its derivatives), while the red beet microgreen juice encapsulates were mainly characterised by apigenin C-glycosides (cytiside and vitexin derivatives). Betalains were mainly found in red beet and amaranth microgreen juice encapsulates. Overall, the microgreen juices encapsulates showed

favourable properties and strong antioxidant activity, highlighting their potential application as functional additives in the food industry.

The final part of this dissertation focused on the application of the obtained encapsulates in a food product – yoghurt. Microgreen juice encapsulates were added to yoghurt and the resulting products were evaluated in terms of physicochemical and textural parameters, total phenolic content, antioxidant activity and sensory properties. The yoghurts enriched with microgreen juice encapsulates exhibited good textural properties (firmness, consistency, cohesiveness, and index of viscosity), reduced syneresis and an attractive colour. All the enriched yoghurts had a higher phenolic content and higher antioxidant activity than the control yoghurts. In addition, the enriched yoghurts showed very good quality and high overall consumer acceptability.

The results obtained in this doctoral dissertation show that the cold-pressed microgreen juices have a diverse and high content of bioactive compounds with strong antioxidant activity, making them potential functional foods. Encapsulation was used to produce microgreen juice encapsulates with favourable physicochemical properties and notable antioxidant activity, while improving the stability of the bioactive compounds present. Incorporation of the microgreen juice encapsulates into yoghurt resulted in improved physicochemical, textural and antioxidant properties of the final product. The obtained microgreen juice encapsulates may be used as food additives in the food industry to enhance the functional value of various products.

Key words: broccoli microgreens (*Brassica oleracea* var. *italica*), amaranth microgreens (*Amaranthus tricolour* L.), red beet microgreens (*Beta vulgaris*), microgreen juices, encapsulation, spray-drying, yogurt, phenolic compounds, betalains, antioxidant activity

Scientific field: Technological engineering

Scientific subfield: Food preservation and fermentation science

UDC: 663.813:631.53.03(043.3)

Садржај:

1. УВОД	1
2. ПРЕГЛЕД ЛИТЕРАТУРЕ	4
2.1. МИКРОБИЈЕ	4
2.1.1. Историја микробиља	4
2.1.2. Појам микробиља.....	5
2.1.3. Производња микробиља.....	8
2.1.4. Развој микробиља и разлике између микробиља и клица	12
2.1.5. Микробије као извор биоактивних једињења	14
2.1.5.1. Фенолна једињења.....	15
2.1.5.2. Глукозинолати	17
2.1.5.3. Минерали	19
2.1.5.4. Витамини.....	20
2.1.5.5. Беталаини	21
2.1.6. Здравствени бенефити коришћења микробиља.....	22
2.1.7. Примена микробиља у производњи прехранбених производа	24
2.2. ИНКАПСУЛАЦИЈА	27
2.2.1. Појам инкапсулације	27
2.2.2. Технике инкапсулације	29
2.2.2.1. Спреј сушење	30
2.2.2.2. Спреј хлађење	32
2.2.2.3. Лиофилизација.....	32
2.2.2.4. Облагање у флуидизованом слоју	33
2.2.2.5. Коацервација.....	33
2.2.2.6. Екструзионе технике инкапсулације	34
2.2.2.7. Емулзификација.....	36
2.2.2.8. Липозоми.....	37
2.2.3. Материјали за инкапсулацију	37
2.2.3.1. Малтодекстрин	38
2.2.3.2. Инулин.....	39
2.2.4. Инкапсулација клица и микробиља различитих биљних врста	40
3. ЦИЉЕВИ ИСТРАЖИВАЊА	42
4. МАТЕРИЈАЛ И МЕТОДЕ	43
4.1. Материјал	43
4.1.1. Микробије.....	43
4.1.2. Носачи за инкапсулацију	43

4.1.3. Сировине за производњу јогурта	43
4.1.4. Хемикалије	44
4.2. Методе.....	44
4.2.1. Производња хладно цеђених сокова од микробиља	44
4.2.2. Карактеризација сокова од микробиља	45
4.2.2.1. Хроматографска анализа	45
4.2.2.1.1. Припрема екстракта микробиља и хладно цеђених сокова од микробиља.....	45
4.2.2.1.2. UHPLC Q-ToF MS анализа биоактивних компоненти микробиља и хладно цеђених сокова од микробиља	45
4.2.2.2. Одређивање рН вредности, растворљиве суве материје, влаге и приноса.....	46
4.2.2.3. Спектрофотометријске анализе	46
4.2.2.3.1. Одређивање садржаја укупних фенолних једињења	46
4.2.2.3.2. Одређивање садржаја укупних флавоноида	47
4.2.2.3.3. Одређивање садржаја бетацијанина, бетаксантина и укупног садржаја беталаина.....	48
4.2.2.3.4. Одређивање садржаја хлорофила а и хлорофила б	48
4.2.2.3.5. Одређивање антиоксидативне активности	49
4.2.2.3.5.1. Одређивање антиоксидативне активности ABTS ⁺ • методом	49
4.2.2.3.5.2. Одређивање антиоксидативне активности DPPH• методом	50
4.2.2.3.5.3. Одређивање антиоксидативне активности FRAP методом	51
4.2.2.4. Сензорно испитивање	52
4.2.2.4.1. Метода бодовања.....	52
4.2.2.4.2. Хедонска скала	53
4.2.3. Микроинкапсулација сокова од микробиља спреј сушењем	53
4.2.4. Карактеризација инкапсулата	54
4.2.4.1. Хроматографска анализа инкапсулата.....	54
4.2.4.1.1. Припрема инкапсулата за хроматографску анализу	54
4.2.4.1.2. UHPLC Q-ToF MS анализа биоактивних компоненти инкапсулата	55
4.2.4.2. Физичко-хемијска карактеризација.....	55
4.2.4.3. Одређивање боје.....	56
4.2.4.4. Морфолошке карактеристике	56
4.2.4.5. ATR-FTIR спектроскопија	57
4.2.4.6. Спектрофотометријске анализе инкапсулата	57
4.2.4.6.1. Припрема инкапсулата за спектрофотометријску анализу	57
4.2.4.6.2. Спектрофотометријско одређивање укупног садржаја фенолних једињења, флавоноида и беталаина	57
4.2.4.6.3. Спектрофотометријско одређивање антиоксидативне активности.....	57

4.2.5. Производња јогурта обогаћених инкапсулатима сокова од микробиља	57
4.2.6. Карактеризација обогаћених јогурта инкапсулатима сокова од микробиља ..	58
4.2.6.1. Текстурална својства	58
4.2.6.2. Одређивање индукованог синерезиса и рН вредности	59
4.2.6.3. Одређивање боје.....	59
4.2.6.4. Спектрофотометријске анализа јогурта.....	59
4.2.6.4.1. Припрема јогурта за спектрофотометријску анализу	59
4.2.6.4.2. Спектрофотометријско одређивање фенолних једињења	59
4.2.6.4.3. Спектрофотометријско одређивање антиоксидативне активности.....	60
4.2.6.4.3.1. ABTS ⁺ • метода	60
4.2.6.4.3.2. FRP метода	60
4.2.6.5. Сензорна анализа	60
4.2.7. Статистичка обрада података	60
5. РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЈА.....	61
5.1. Хладно цеђени сокови од микробиља	61
5.1.1. UHPLC Q-ToF MS анализа биоактивних компонената микробиља броколија, цвекле и амаранта	61
5.1.2. Физичко-хемијски параметри и принос сокова од микробиља	74
5.1.3. UHPLC Q-ToF MS профили сокова од микробиља.....	76
5.1.4. Укупни садржај фенолних једињења, флавоноида, беталаина и хлорофила у соковима од микробиља.....	88
5.1.5. Антиоксидативна активност сокова од микробиља	89
5.1.6. Сензорно испитивање сокова од микробиља.....	89
5.2. Инкапсулати сокова од микробиља	92
5.2.1. Физичко-хемијска карактеризација инкапсулата	92
5.2.2. Боја инкапсулата.....	95
5.2.3. Морфолошке карактеристике инкапсулата.....	96
5.2.4. ATR-FTIR анализа инкапсулата	101
5.2.5. Укупни садржај фенолних једињења, флавоноида и беталаина у инкапсулатима	103
5.2.6. UHPLC Q-ToF MS анализа инкапсулата	105
5.2.7. Антиоксидативна активност инкапсулата.....	113
5.3. Јогурт обогаћен инкапсулатима сокова од микробиља	115
5.3.1. Текстурална својства јогурта.....	115
5.3.2. Физичко-хемијски параметри и боја јогурта	117
5.3.3. Укупни садржај фенолних једињења и антиоксидативна активност јогурта	120
5.3.4. Сензорно испитивање јогурта	122
6. ЗАКЉУЧАК.....	125

7. ЛИТЕРАТУРА.....	131
8. ПРИЛОЗИ.....	160
БИОГРАФИЈА АУТОРА.....	161
Изјава о ауторству.....	162
Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада.....	163
Изјава о коришћењу	164

1. УВОД

У последње време постоји све веће интересовање међу потрошачима за храном која поседује заштитне и благотворне ефекте на људско здравље, па се стога и поље истраживања у оквиру прехранбене технологије креће у том смеру, тј. ка креирању нових функционалних производа. Овај тренд је посебно уочљив последњих 20 година, са акцентом на истраживањима везаним за развој функционалне хране (Tomic et al., 2017). Храна се може посматрати као функционална само уколико пружа позитиван ефекат на једну или више циљаних функција у људском организму, тако помажући у превенцији различитих болести.

Од почетка употребе микробиља у пределима древних цивилизација, његовог коришћења за различите намене од религијских до терапеутских, па све до тренутка његове експанзије и комерцијализације широм света, може се рећи да не постоји сегмент у друштву где микробиље није нашло примену. Када је реч о појму микробиље, оно је у научним круговима препознато као нова функционална храна и потенцијална храна будућности, а може се посматрати и као кулинарска биљка због изразитог укуса, мириса и текстуре (Renna et al., 2016; Choe et al., 2018; Ebert, 2022). Оно представља младе и јестиве биљке које је могуће производити из семена различитих врста воћа, поврћа, ароматичних, зељастих и дивљих врста (Di Gioia et al., 2016). Микробиље одликује кратак период између сетве до бербе при чему се микробиље бере између 7 и 21 дана од процеса клијања, када су већ потпуно развијени котиледонски листови, стабло, корен и први прави листови (Xiao et al., 2016; Verlinden, 2020). Велике предности производње микробиља у односу на зрело поврће представљају минимални захтеви за гајење, укључујући мали простор за производњу великих количина микробиља, одсуство пестицида и ђубрива и незнатни захтеви за водом и сунчевом светлошћу (Zhang et al., 2020; Budavári et al., 2024). Када је реч о нутритивној вредности, микробиље одликује високи садржај антиоксиданаса (фенолна једињења, витамини, хлорофили, итд.), чак виши него у зрелој биљци, што додатно подстиче њихов узгој и примену у прехранбеној индустрији (Yadav et al., 2019; Martínez-Ispizua et al., 2022). Велики број комерцијално доступних биљака се узгаја као микробиље, док су најзначајније врсте из фамилија *Amaranthaceae*, *Amaryllidaceae*, *Apiaceae*, *Asteraceae*, *Brassicaceae*, *Cucurbitaceae*, *Gramineae*, *Leguminosae*, *Lamiaceae* и *Liliaceae* (Teng et al., 2021; Dereje et al., 2023).

Микробиље броколија, амаранта и цвекле се сврстава у популарне врсте за производњу и у истраживачке сврхе. Претходне студије су показале да ове врсте микробиља представљају богат извор антиоксиданаса, као што су фенолна једињења, хлорофили, беталаини, глукозинолати и његови деривати (Kou et al., 2015; Rocchetti et al., 2020; Li et al., 2021; Liu et al., 2022). Поред тога, постоје бројна истраживања која су повезала редовно конзумирање микробиља са различитим здравственим бенефитима попут антиканцерогених, антимикробних, антиоксидативних, антигојазних, антиинфламаторних и антидијабетских дејстава (Zhang et al., 2021; Teng et al., 2021; Jambor et al., 2022), што је директно у вези са високим садржајем биоактивних једињења (Zhang et al., 2021; Teng et al., 2021; Jambor et al., 2022; Partap et al., 2023).

Микробиље се најчешће користи у свежој форми за припрему различитих салата, као додатак јелима, али и као додатак у пекарским производима, резанцима и кисело-млечним производима (Xiao et al., 2012; Teng et al., 2021; Kumar & Singh 2024; Gunjal et al., 2025; John et al., 2025). Још једна од могућности пласирања микробиља на тржишту јесте производња сокова од микробиља; ипак, до сада су се сокови од микробиља користили само као један од састојака у мешавинама различитих сокова у циљу добијања здравих напитака (Sharma et al., 2020; Senthilnathan & Muthusamy, 2021; Sharma et al., 2021; Senthilnathan & Muthusamy, 2022). Када је реч о производњи сокова, хладно цеђени сокови се сматрају посебно квалитетним производима због минималног утицаја цеђења на биоактивне компоненте присутне у соку

(Lee et al., 2013; Biancaniello et al., 2018). На основу прегледа литературе и мањка истраживања која се баве коришћењем микробиља броколија, цвекле и амаранта у производњи хладно цеђених сокова и њихове карактеризације фенолних профила, један од циљева ове докторске дисертације је био производња и детаљна карактеризација хладно цеђених сокова од микробиља наведених врста. Карактеризација хладно цеђених сокова обухвата анализу фитохемијског састава, физичко-хемијске карактеристике, антиоксидативне карактеристике и сензорну прихватљивост.

Међутим, главно ограничење микробиља и његових сокова представља кратак рок трајања, што намеће потребу за развојем метода које би продужиле трајање ових производа, са аспекта очувања њихових биоактивних компонената и њихових функционалних својстава. Као један од ефективних начина очувања биоактивних једињења у соковима од микробиља се намеће примена инкапсулације.

Инкапсулација је добро познат и широко коришћен процес за заштиту биоактивних једињења применом различитих техника и носача, а заснива се на формирању заштитног слоја носача око активне компоненте (Nedović et al., 2011; Ortega-Hernández et al., 2023). На овај начин постиже се стабилност и заштита активних компоненти производа (или чистих компоненти) од спољне средине, а тиме и продужење његовог рока трајања, маскирање непријатних укуса и мириса, олакшано руковање итд. (Shahidi & Han, 1993; Zuidam & Shimon, 2010; Sonawane et al., 2020). Инкапсулација је до сада примењивана за заштиту биоактивних компонената добијених из клица, микробиља и његових екстраката, укључујући активне компоненте из клица кикирикија (Lee et al., 2013; Lee et al., 2015), клица броколија (Azarashkan et al., 2022a), клица пшеничне траве (Akbas et al., 2017), клица кеља (Ortega-Hernández et al., 2023), клица чија семена (Abdel-Aty et al., 2024), микробиља мунго пасуља (Lekshmi & Nair, 2020) и микробиља црвене мизуне (Bafumo et al., 2025), итд.

У литератури се могу наћи различите технике инкапсулације, међутим спреј сушење се сматра једном од најстаријих и најчешће коришћених метода у прехранбеној индустрији, пре свега због своје економичности, флексибилности и једноставности (Araújo-Díaz et al., 2017). Имајући све то у виду, посебан фокус ове докторске дисертације је инкапсулација сокова од микробиља техником спреј сушења уз примену угљенохидратних носача – малтодекстрина и инулина у циљу заштите биоактивних компоненти и продужења њиховог рока трајања. Споменути угљени хидрати се доста често користе као носачи за инкапсулацију због позитивног утицаја на заштиту биоактивних једињења, док са друге стране имају ниску цену и пожељне физичко-хемијске карактеристике (Toneli et al., 2007; Wu et al., 2014; Flores-Mancha et al., 2020). Стога, основни циљ ове докторске дисертације је добијање инкапсулата сокова од микробиља применом технике спреј сушења унутар малтодекстрина и инулина као носача и њихове детаљне карактеризације. Методе карактеризације добијених инкапсулата укључују електронску микроскопију (SEM), UV-Vis спектрофотометрију, ATR-FTIR спектроскопију, течну хроматографију високих перформанси UHPLC Q-ToF-MS, као и физичко-хемијске и антиоксидативне анализе које додатно промовишу њихову потенцијалну примену у прехранбеној индустрији, са фокусом на развој нових функционалних адитива.

Фортификација (обогаћење) представља процес додавања нутријената у храну током процеса припреме са циљем повећања њене нутритивне вредности, при чему се значајна пажња усмерава на додавање нутријената који су у дефициту у храни која се обогаћује (Ahmad et al., 2022). У том смислу, кисело-млечни производи не садрже фенолна једињења као што су фенолне киселине, флавоноиди и антоцијани и могу бити погодан матрикс за додатак биоактивних једињења (Rashwan et al., 2023). Биљни извори који су до сада коришћени за обогаћивање ових производа укључују воће, поврће, есенцијална уља, житарице и ароматичне биљке (Ahmad et al., 2022; Kim et al., 2022). Штавише, додатак природних антиоксиданаса има позитиван ефекат на сензорна својства добијеног производа,

као што су боја, тврдоћа, редукован синерезис и спречавање раста патогених микроорганизама (Mohammadi-Gouraji et al., 2019). Из тог разлога, циљ ове докторске дисертације је био инкорпорирање добијених инкапсулата у кисело-млечни производ – јогурт, у циљу побољшања његових физичко-хемијских својстава, количине биоактивних једињења, антиоксидативних својстава и сензорне прихватљивости од стране потрошача.

Сходно томе, један од циљева ове дисертације био је производња хладно цеђених сокова од микробиља амаранта, броколија и цвекле, њихова фитохемијска карактеризација и одређивање физичко-хемијских и антиоксидативних карактеристика, као и сензорне прихватљивости. Даље, следећи циљ је подразумевао инкапсулацију добијених сокова техником спреј сушења унутар малтодекстрина и инулина као носача и њихова карактеризација у погледу фитохемијског састава, састава фенолних једињења, беталаина и антиоксидативне активности, морфологије добијених инкапсулата и физичко-хемијских карактеристика. Коначно, циљ ове дисертације био је и обогаћење кисело-млечног производа инкапсулатима сокова од микробиља и њихова карактеризација у погледу физичко-хемијских својстава, количине биоактивних једињења, антиоксидативних својстава и сензорне прихватљивости од стране потрошача. На основу свега наведеног, ова дисертација пружа систематски приступ и научни допринос у развоју сокова и потенцијално функционалних адитива – инкапсулата од сокова микробиља, као и функционалних кисело-млечних производа са потенцијалном биолошком активношћу.

2. ПРЕГЛЕД ЛИТЕРАТУРЕ

2.1. МИКРОБИЉЕ

2.1.1. Историја микробиља

Употреба проклијалих семена у људској исхрани има дуге корене још из времена древног Египта пре око 3000 година п.н.е. (Abdallah, 2008; Ebert, 2022; Singh et al., 2024). Наиме, река Нил је због своје плодне долине за древне Египћане значила опстанак, захваљујући чему је и дошло до развоја пољопривреде на тим просторима. При том су најчешће узгајане житарице попут пшенице и јечма (Allen et al., 1997; Abdallah, 2008). Узгој житарица на овим просторима спомиње се и у Библији, у причи о целомудреном Јосифу и његовом старању над земљом египатском, а за кога се сматра да је живео негде око 3000. године п.н.е., где се говори о великом изобиљу свакојаког жита у овој земљи: „*И стаде Јосиф купити за тијех седам година свакога жита што бјеше по земљи мисирској (египатској)*“ (Библија, 2018). Када је реч о клицама и микробиљу, они су се у древном Египту користили за различите намене, од религијских до примене у исхрани, при чему је за старе Египћане била посебно битна обредна намена која се односила на прављење огрлица од проклијалих зрна јечма почетком пролећа, као симбол обнове и васкрсења бога Озириса (Abdallah, 2008; Brier & Hobbs, 2008). Клијање семена се и у Хришћанству користи као слика у циљу описивања Христовог васкрсења (Beuk, 2020).

Негде у приближно истом временском периоду јавља се традиција коришћења проклијалих зрна и у древној Кини, територији на којој се проклијала зрна и данас највише користе у људској исхрани (Szopa et al., 2023). Клице се користе у Кини већ 5000 година, при чему су првобитно коришћење клице махунарки и житарица, а затим и осталих биљака (Szopa et al., 2023). Једна од најпознатијих и најстаријих клица коришћених у Кини је мунго пасуљ (Price, 1988; Waliat et al., 2023). Због своје нутритивне вредности клице су коришћене и у медицинске сврхе; кинески лекари су преписивали клице за лечење различитих здравствених поремећаја код људи (Lu & Cao, 2015).

Током средњег века примена клица се проширила и на остатак планете. Важно је напоменути да су нутритивне бенефите проклијалих зрна (микробиља) уочили кинески морепловци, крстарећи их током дугих пловидби. Наиме, кинески морепловац, дипломата и истраживач, **Zheng He** и његова посада је током пловидби носила велике количине зрна соје, пшенице, проса и пиринча како би месецима могли да остану на мору без допуне залиха, али и како би уједно спречили појаву скорбута. Зрна су остављали у води да проклијају и у том облику их затим користили (Ding et al., 2007).

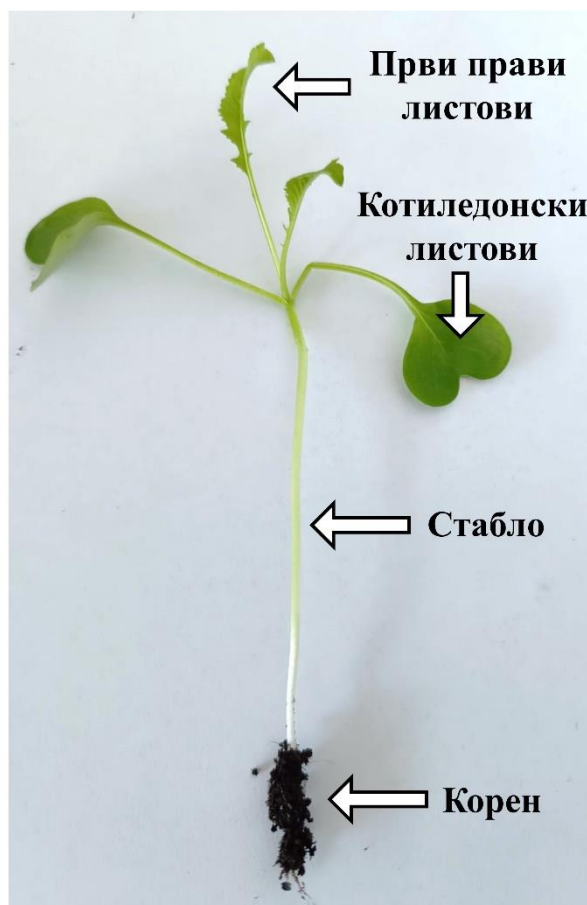
Са азијског континента се употреба микробиља проширила на запад, где је због свог препознатљивог изгледа, укуса, текстуре и позитивног ефекта на здравље, највећу употребну експанзију доживела последњих деценија двадесетог века (Lobiuc et al., 2017; Sharma et al., 2022). Почетком 20. века, тачније 1930. године, почиње производња микробиља у САД од стране Северноамеричких апотека (енгл. *North American Pharmacy*), које су производиле микробиље у том тренутку само за медицинске сврхе, укључујући производњу и сушење микробиља пшеничне траве, која се у том облику и продавала потрошачима (Sharma et al., 2023; Singh et al., 2024). Популарност микробиља је наставила да расте и то пре свега у зимским месецима, када зрело поврће и житарице нису у понуди. Ово је довело до развоја производње микробиља као „зимског биља/поврћа“ и у кућама, на прозорима који су окренути на сунчаној страни домова током 1960-их година у Америци, укључујући производњу врста као што су хељда, сунцокрет и ротквица (Prakash, 2019; Rao et al., 2024). Из домаћинства, производња и гајење микробиља долазе до ексклузивних ресторана. Наиме, кувари у престижним ресторанима почели су да употребљавају микробиље као додатак различитим јелима у циљу обогаћивања текстуре, изгледа и укуса различитим јелима

(Gerovac et al., 2016; Abaajeh et al., 2023). Микробиле је први пут званично коришћено у ове сврхе последњих неколико деценија прошлог века (1980), у Калифорнији, у граду Сан Франциску (Di Gioia et al. 2017) и то у декоративне сврхе и као додатак јелима, укључујући свеже салате, сендвиче и супе (Kyriacou et al., 2016; Verlinden, 2020; Abaajeh et al., 2023). Касније, средином 90-их година кувар Крег Хартман гајио је микробиле зелене салате у хотелској башти и додавао је разним јелима као декорацију (Sharma et al., 2023). Посебно је интересантна чињеница да је термин „микробиле“ уведен тек крајем 20. века (1998. године), док је пре тога поистовећивано са проклијалим семенима (Nivedha and Priya, 2018). Почетком новог миленијума, микробиле доживљава значајну комерцијализацију уз истовремени пораст броја доступних врста биљака на тржишту (Singh et al., 2024). У минулим деценијама микробиле је добило значај и у науци, где се испитује у различите сврхе.

2.1.2. Појам микробиле

Микробиле (енгл. *Microgreens*) је маркетиншки термин који се користи за описивање овог производа и његово сврставање у одговарајућу категорију ради промоције и рекламирања, али, нажалост, без постојања званичне правне дефиниције (Teng et al., 2021; Dereje et al., 2023). За разлику од микробиле, клице имају своју правну дефиницију изражену у Правилнику о општим и посебним условима хигијене хране и микробиолошким критеријумима за храну (Сл. гласник РС бр. 30/2024), а која гласи: „Клице јесу производи добијени клијањем семенки и њиховим развојем у води или другом медијуму, убраним пре развоја правих листова и предвиђених да се једу цели, заједно са семенком“. Непостојање правне дефиниције микробиле може се објаснити тиме што је сам појам настао релативно недавно, па се дефиниције овог термина за сада налазе искључиво у научним круговима (Verlinden, 2020). Штавише, све постојеће дефиниције микробиле представљају логички смишљене формулације које описују изглед и намену овог производа, са посебним освртом на врсте биљака које се користе за његову производњу и време потребно за његову бербу. Стога, дефиниција микробиле се може формулисати тако да оно представља младо, незрело и јестиво биље које се може произвести од различитих семена поврћа, зачинских и лековитих биљака, а одликују га интензиван укус, мирис и текстура (Zhang et al., 2020; Singh et al., 2024). Микробиле се бере у тренутку када има потпуно развијена два котиледонска листа, са или без појаве првих правих листова до чега, у зависности од биљне врсте, долази између 7 и 21 дана од клијања (Xiao et al., 2016; Di Gioia, et al., 2017; Verlinden, 2020). У највећем броју случајева, микробиле се бере унутар 3 недеље након процеса клијања, односно када достигне ниво развоја који је оптималан за конзумацију (Sun et al., 2013; Sharma et al., 2022). Xiao et al. (2016) дали су приказ за период раста 30 врста биљака из фамилије Brassicaceae, који се кретао од 5 дана за *Raphanus sativus* L. до 20 дана за *Barbarea verna* (P. Mill.) Aschers врсте.

Када је реч о морфологији микробиле, она је сасвим једноставна и чине је корен, централно стабло и котиледонски листови са или без првих правих листова (Di Gioia et al., 2017) (Слика 2.1). Једноставна морфологија и мали раст је нешто што је својствено микробиле, које у дословном преводу значи „мало биље“ или „мала биљка“, а што се потврђује чињеницом да расте свега до око 10 cm висине (Partap et al., 2023; Singh et al., 2024). Због ове особине, микробиле се често назива и „конфетама од биља и поврћа“, што се односи на њихову малу величину и разлике у боји које варирају у зависности од врсте (Abaajeh et al., 2023). Узимајући у обзир величину микробиле, иако су мале величине, ипак су веће од клица, док су мање од беби биља (енгл. baby greens) и зрелих биљака (Mir et al., 2017; Teng et al., 2021; Partap et al., 2023). Важно је напоменути да код микробиле корен није јестив из практичних и безбедносних разлога, као што је то случај код клица, јер се микробиле гаји најчешће у земљи или неком другом медијуму где је присуство микроорганизама евидентно веће него у чистој води (Verlinden, 2020).



Слика 2.1. Морфологија микробиља

Постоји велики број биљака које се користе за производњу микробиља и које су комерцијално доступне, при чему неке од најзначајнијих врста припадају фамилијама *Amaranthaceae*, *Amaryllidaceae*, *Apiaceae*, *Asteraceae*, *Brassicaceae*, *Cucurbitaceae*, *Gramineae*, *Leguminosae*, *Lamiaceae* и *Liliaceae* (Teng et al., 2021; Dereje et al., 2023). Са друге стране, у научне сврхе највише су истраживане врсте из фамилија: *Amaranthaceae*, *Apiaceae* и *Brassicaceae*, првенствено због велике количине нутријената, као и примамљиве боје и укуса (Dereje et al., 2023). Најпопуларнији представници ових фамилија су врсте попут амаранта (*Amaranthus tricolor*), цвекле (*Beta vulgaris*), броколија (*Brassica oleracea* L. var. *italica*), црвеног купуса (*Brassica oleracea* L. var. *capitata* f. *rubra*), руколе (*Eruca sativa* Mill.), грашка (*Pisum sativum*), кеља (*Brassica oleracea* L. var. *alboglabra*), поточарке (*Nasturtium officinale*), зелене салате (*Lactuca sativa*), спанаћа (*Spinacia oleracea*), црног лука (*Allium cepa*), коријандера (*Coriandrum sativum*), босиљка (*Ocimum basilicum* L.), соје (*Glycine max*), кикирикија (*Arachis hypogaea*), јечма (*Hordeum vulgare*), сочива (*Lens culinaris*), мунго пасуља (*Vigna radiata*), ротквице (*Raphanus sativus* L.), сунцокрета (*Helianthus annuus*), пшеничне траве (*Triticum aestivum* L.) итд. (Kyriacou et al., 2016; Xiao et al., 2016; Teng et al., 2021; Ebert, 2022; Dereje et al., 2023; Singh et al., 2024). На Слици 2.2 визуелно су приказане различите врсте микробиља.



Слика 2.2. Сликосни приказ комерцијално доступних одабраних врста микробиља

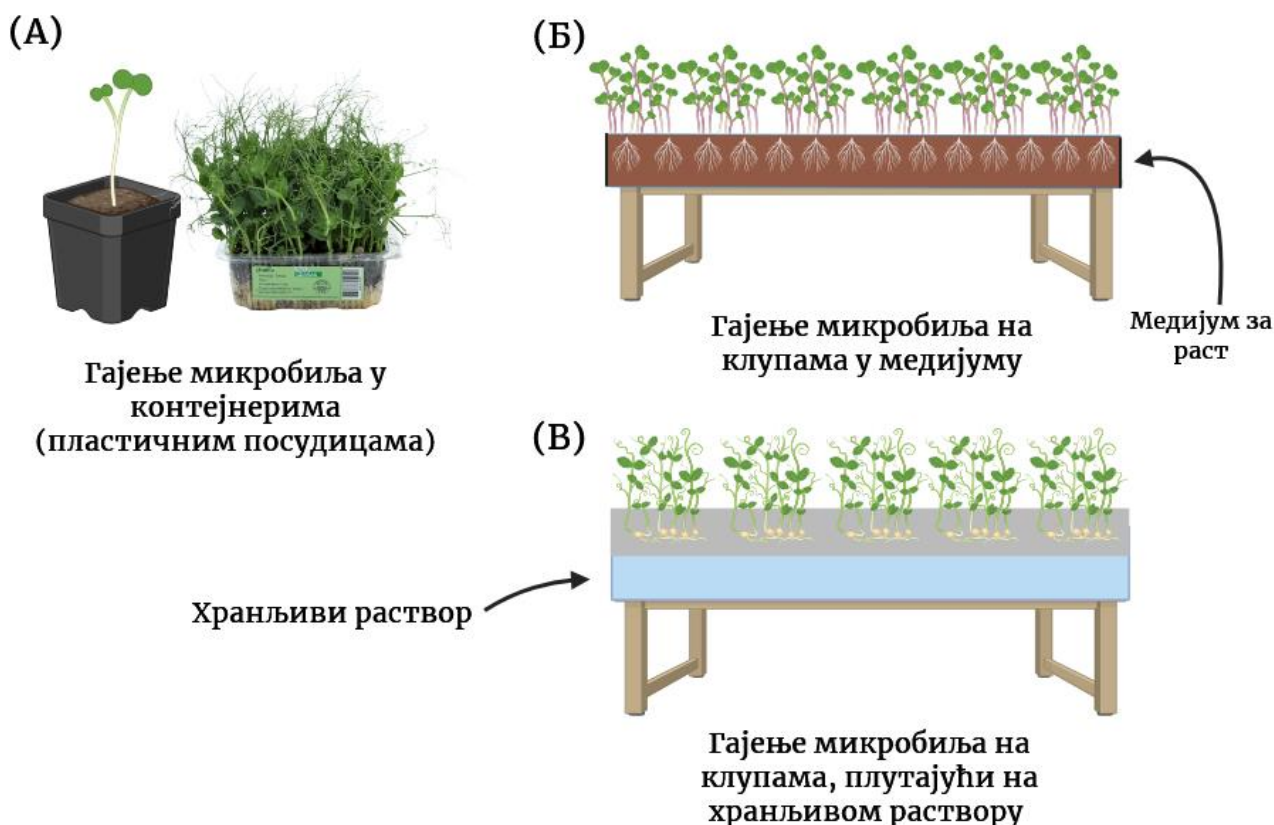
У последње време неке од дивљих врста биљака су нашле потенцијалну примену за производњу микробиља, а нарочито оне које су јестиве (Galieni et al., 2020). У древним периодима дивље биљке су се најчешће користиле у ситуацијама када је наступала глад, сушна година или у планинским пределима где је било тешко узгајати биљке због неповољних природних услова. У савременом свету, дивље биљке постају популарне због њиховог доброг нутритивног састава који се огледа у значајним количинама макро- и микронутријената (Łuczaj & Pieroni, 2016). Lenzi et al. (2019) користили су семена дивљих врста биљака (*Sanguisorba minor*, *Sinapis arvensis* L., и *Taraxacum officinale*) за производњу микробиља, док је бербa вршена при појави првих правих листова. Резултати истраживања показали су да микробиље дивљих врста биљака садржи значајне количине макро- и микроелемената попут калцијума, магнезијума, фосфора, гвожђа, бакра, цинка и мангана, као и других биоактивних једињења (хлорофила, каротеноида и фенолних једињења), и то чак више него код зреле биљке. Са друге стране, висок садржај нитрата и одређених метала у овом микробиљу представља једну од критичних тачака, указујући на потенцијално штетне ефекте по здравље услед њиховог уноса.

Тренд обогаћивања различитих врста биљака елементима који су дефицитарни у људској исхрани је посебно популаран код клица и микробиља. Штавише, примена поступка биофортификације селеном (Se) на микробиљу је добар начин за повећање количине овог минерала у микробиљу дивљих врста (*Rumex acetosa* L., *Plantago coronopus* L., *Portulaca olerace* L.), које на тај начин постаје нови производ са високом нутритивном вредношћу, притом обезбеђујући довољне количине дефицитарних елемената у исхрани људи (Puccinelli et al., 2021).

2.1.3. Производња микробиља

Главна предност производње микробиља јесте свакако могућност производње на малим површинама. За разлику од зрелих биљака које се најчешће производе на отвореном простору, а раст се стимулише сунчевом енергијом и поспешује ђубрењем, код микробиља производња се најчешће одвија у затвореном простору и под утицајем вештачког осветљења (Kyriacou et al., 2016). Такође, микробиље се може гајити и на отвореном у земљи (Kyriacou et al., 2016). Међутим, посебно је важно напоменути да је производња микробиља доживела експанзију развојем вертикалне пољопривреде (енгл. *Indoor vertical farming*) у затвореном простору, јер представља обећавајуће решење у погледу искоришћења простора за гајење биљака у контролисаним условима (Budavári et al., 2024). Такође, урбана пољопривреда (енгл. *Urban farming*) постаје популарна опција за гајење биљака са кратким периодом раста (микробиље), омогућавајући контролисање светлости, наводњавања и влажности, што је чини еколошки прихватљивијом (Zhang et al., 2021). Наведене предности су омогућиле да се пољопривредом баве и становници града, а уместо отвореног простора на њиви за гајење биљака, могу користити само једну просторију у згради или кући.

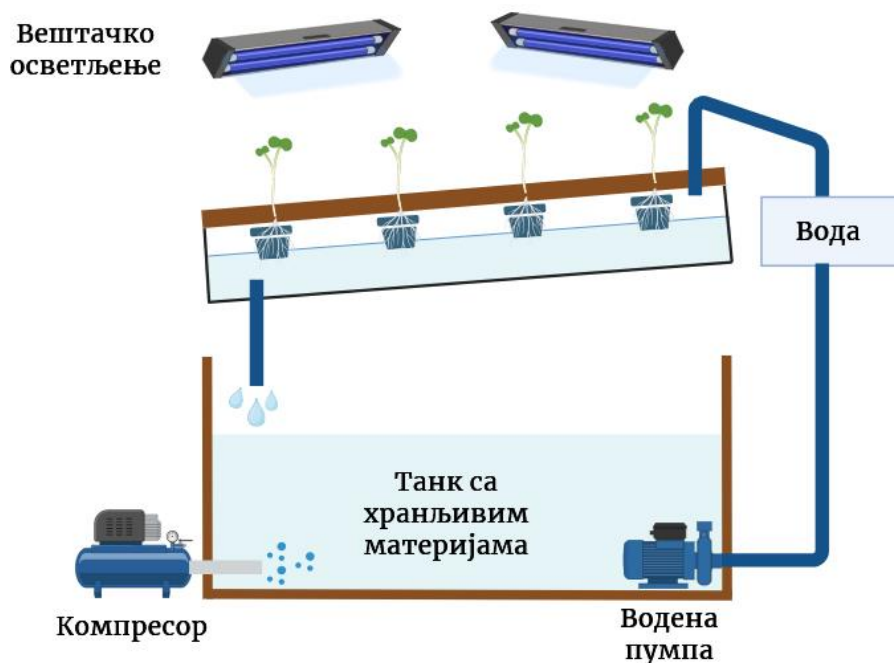
Када је реч о комерцијалној производњи микробиља, она се најчешће одвија у затвореном простору унутар стакленика или високих тунела и то углавном без примене земљишта као супстрата (Di Gioia et al., 2017). Разликују се три система гајења микробиља (Teng et al., 2021) (Слика 2.3). Први и најједноставнији систем гајења је производња микробиља у „контејнерима“ различитих величина, са рупама на дну, ради дренажа (избацивања) вишка воде и/или раствора нутријената, и спречавања развоја микроорганизама (Di Gioia et al., 2017). Додатно, производња микробиља у пластичним контејнерима једина је од свих система производње која омогућава да се берба микробиља одложи до тренутка куповине од стране корисника, одржавајући свежину микробиља до тренутка конзумације. Други систем за гајење микробиља подразумева да се микробиље гаји на „каналацима“ или на „клубама“ унутар којих се налази подлога за раст микробиља, са благим нагибом како би се омогућило суб-наводњавање (воде се испоручује у зону корена микробиља) водом или хранљивим раствором, као и њихова дренажа (Di Gioia et al., 2017). У овом систему берба се одвија након достизања потпуне зрелости микробиља, које се након тога пере, суши и пакује. Трећи систем гајења микробиља који се најмањи користи за комерцијалну производњу јесте „плућајући систем“, где велики број посудица плива по води и хранљивом раствору који се налазе на клупи, али не циркулише па је неопходно обогатити га кисеоником (Di Gioia et al., 2017; Fayeziadeh et al., 2023). Такође, као и код другог система гајења, берба се врши непосредно након производње, након чега се микробиље пакује и дистрибуира на тржиште.



Слика 2.3. Системи гајења микробиља. (А) Гајење микробиља у контејнерима (пластичним посудима); (Б) Гајење микробиља на клупама у медијуму и (В) Гајење микробиља на клупама, плутајући на хранљивом раствору. (направљено у програму Biorender)

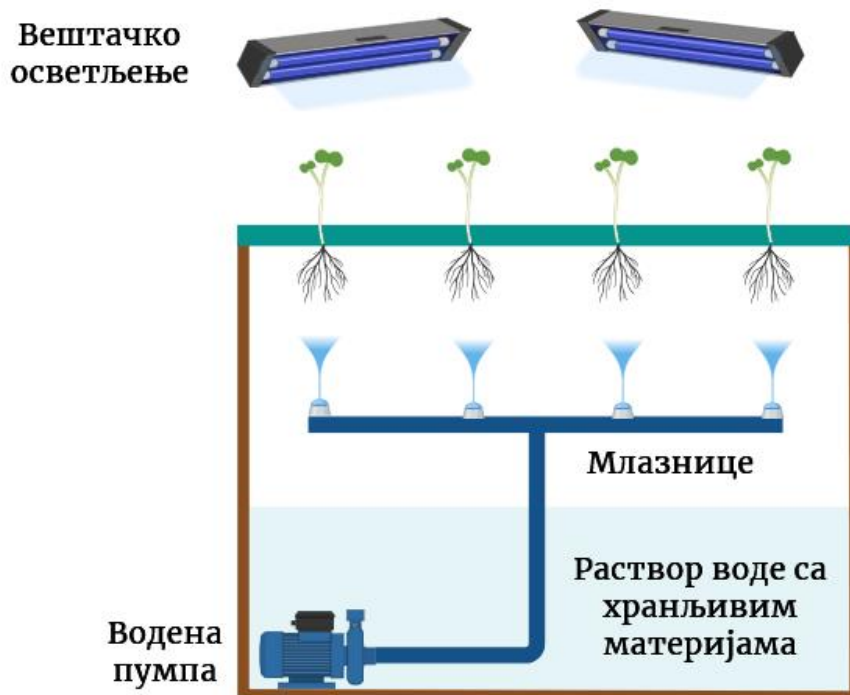
За производњу микробиља користе се такође неколико модерних техника као што су, хидропоника, аеропоника и аквапоника.

Хидропоника се најчешће користи за комерцијално гајење биљака због високе продуктивности у погледу искоришћења воде и хранљивих материја, при чему се постиже виши принос микробиља у поређењу са техником гајења на клупама (Chen et al., 2020; Ciuta et al., 2020). Овај систем, како сама реч каже, функционише тако што биљка плута на води у којој су растворени хранљиви састојци које биљка користи за свој раст. Микробиље је најчешће смештено у посуди са супстратом која плута у хранљивом раствору, док биљка расте апсорбујући хранљиве материје преко корена (Moraru et al., 2022). Иако данас прихваћена као један од најмодернијих система, хидропоника датира још од старог Египта; гајење биљака у води, без употребе земљишта, описано је у хијероглифима (El-Ramady et al., 2014). Шематски приказ хидропонског гајења микробиља NFT (енгл. *Nutrient Film Technique* - техника хранљивог филма) техником је приказан на **Слици 2.4**. Принцип хидропонике је заснован на протоку хранљиве материје у плитком слоју до корена биљке, у циљу допремања потребне количине воде, хранљивих материја и кисеоника (Son et al., 2019; Suheri et al., 2024). Вода и хранљиве материје које нису усвојене од стране биљке се враћају у танк са хранљивим материјама. Предност хидропонике у односу на гајење у замљишту представља заштита од преношења штеточина и болести преко медијума за раст до биљке (Du et al., 2022). Овај систем се може користити током целе године, независно од годишњег доба, јер се производња одвија унутра, штеди се вода и захтева мање простора од традиционалне производње микробиља у земљишту. Са друге стране, мана овог система се огледа у повећаним трошковима за енергију, опрему и простор (Singh et al., 2024).



Слика 2.4. Хидропонски систем за гајење микробиља (направљено у програму Biorender)

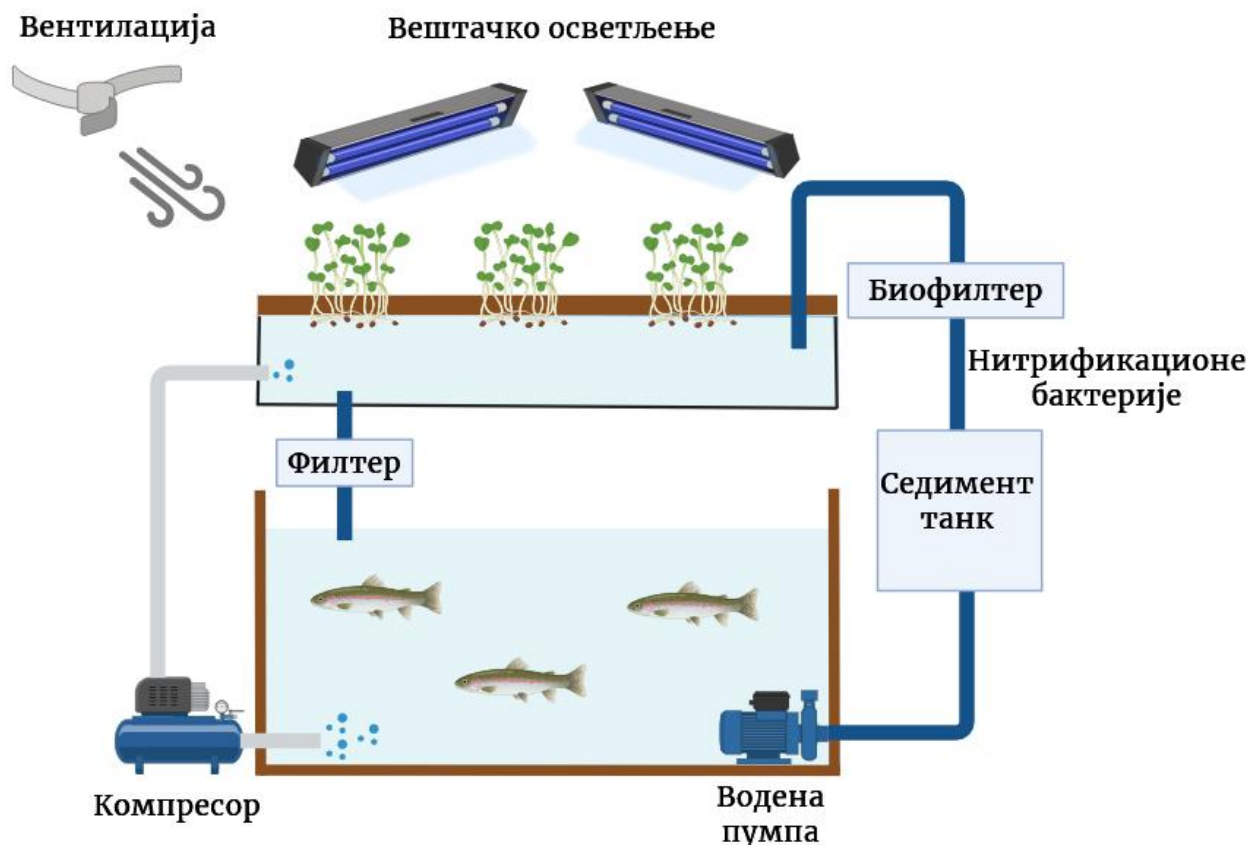
Аeropоника је друга савремена техника за производњу микробиља која не захтева употребу замљишта или других супстрата за развој микробиља, већ се корен биљке прска раствором хранљивих материја (Singh et al., 2024). Овај систем подразумева да се корени биљке налазе у затвореном танку, а у близини њих се налазе млазнице и цеви за достављање раствора са хранљивим материјама у виду аеросола, док техника атомизације (распршавања) воде и хранљивих материја под високим притиском омогућава усвајање свих неопходних нутријената за раст биљке преко корена (Niu & Masabni, 2022; Fasciolo et al., 2023). Овај систем гајења биљака омогућава највећу ефикасност искоришћења воде и већу доступност кисеоника у зони корена у односу на све остале системе узгајања (Teng et al., 2021). Упркос бројним предностима, тренутно постоји само неколико компанија које гаје микробиље применом ове технологије (Du et al., 2022). Шематски приказ aeropонског гајења микробиља приказан је на Слици 2.5.



Слика 2.5. Аеропонски систем за гајење микробиља (направљено у програму Biorender)

Најмодернији систем за гајење микробиља је аквапоника. Аквапоника представља систем за истовремено узгајање биљака и риба, развијен као одговор на неконтролисану употребу хемијских ђубрива у производњи биљака и отпада који настаје у аквакултури (Masabni & Niu, 2022). У овом систему затвореног круга, отпад богат амонијаком који производе рибе претвара се помоћу нитрификујућих бактерија у хранљиве материје које служе за исхрану биљке, док биљке играју улогу „филтера“ за пречишћавање воде за рибе, уклањањем отпадних производа и вишка хранљивих материја (Rajalakshmi et al., 2022). Кроз смањење отпада и ефикасно коришћење ресурса, аквапоника представља пример циркуларне економије у пољопривреди и производњи хране (Aleksić & Šušteršič, 2020). Микробиље и клице су младе саднице којима је за раст потребно само неколико недеља, а могу да расту у различитим супстратима и системима. Њихово кратко време раста и ниски захтеви за хранљивим материјама чине их идеалним за узгајање у свим модерним пољопривредним праксама, укључујући и аквапонику. До сада постоји само неколико истраживања која су испитивала узгајање микробиља у аквапоници, у поређењу са опсежнијим истраживањима гајења клица и микробиља у хидропоници. Узгајање микробиља руколе у систему аквапоники са златним рибицама позитивно је утицало на брзину раста микробиља (Kizak & Kapaligöz, 2019). Такође, предност примене аквапонског система у односу на класичне методе гајења јесте бржа стопа раста микробиља, што је потврђено и експериментално (Chebotarev & Naumov, 2024). Микробиље ротквице узгајано у систему аквапоники имало је већи принос и виши садржај укупних фенолних једињења и флавоноида у поређењу са оним гајеним конвенционално и у систему хидропоники (Shahril Efzueni, 2023). Поред евидентног позитивног утицаја на принос микробиља, аквапонски систем представља и ефикасан систем за гајење водених организама. Наиме, шампи узгајани у систему аквапоники имали су високу стопу преживљавања и добре карактеристике раста, док је отпадна вода из њиховог узгоја позитивно утицала на принос микробиља из фамилија Brassicaceae и Amaranthaceae (Guerreiro et al., 2024). Зелена салата и рукола су успешно узгајани коришћењем отпадне воде од узгоја пастрмке као извора хранљивих материја, уз ефикасно коришћење воде и уштеду ђубрива у поређењу са конвенционалном производњом (Chatzigeorgiou et al., 2024). Главно ограничење система аквапоники за узгајање микробиља, клица и младих листова јесте потенцијална микробиолошка контаминација из рециркулишуће воде са хранљивим

материјама (Baker et al., 2019). Шематски приказ гајења микробиља применом аквапонског система је приказан на **Слици 2.6**.



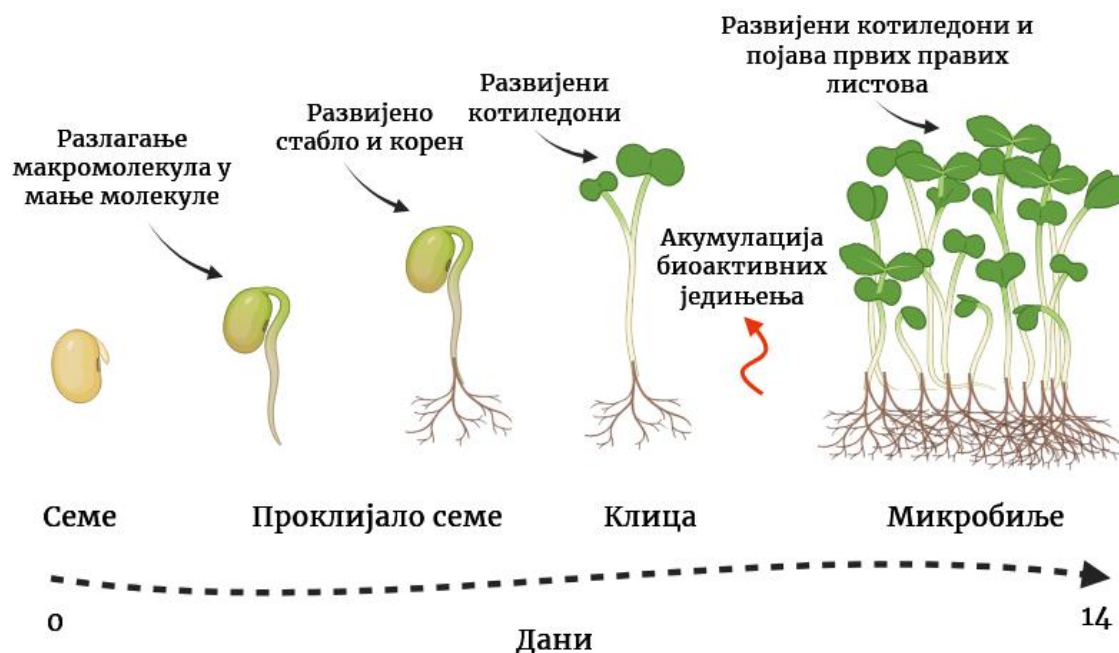
Слика 2.6. Аквапонски систем за гајење микробиља (направљено у програму Biorender)

2.1.4. Развој микробиља и разлике између микробиља и клица

Узимајући у обзир да је за производњу микробиља потребно само неколико недеља, раст и развој биљке је неопходно прекинути у одређеном тренутку. Развој микробиља укључује следеће фазе (Verlinden, 2020) (**Слика 2.7**):

- 1) клијање семена;
- 2) развој котиледона;
- 3) развој првих правих листова.

Семе одређене биљке садржи велику количину угљених хидрата (скроба и других полисахарида), протеина, масних киселина, витамина, минерала потребних за развој биљке, који током процеса клијања доживљавају низ промена (Saithalavi et al., 2021). Активација семена се дешава када семе упије воду, у присуству повољне температуре и кисеоника, а најчешће у мраку. Након активације семена долази до фазе клијања. Током фазе клијања семена јавља се читав низ физиолошких и биохемијских процеса: 1) развој корена и стабљике и издуживање котиледона, док се макромолекули разлажу у мање молекуле чиме се повећава њихова сварљивост; 2) смањење антинутритивних фактора (фитата, оксалата и танина); 3) акумулација биоактивних једињења (фенолна једињења и глукозинолати) и последично повећање антиоксидативне активности и 4) повећање садржаја витамина (Zhang et al., 2020; Teng et al., 2021; Ebert, 2022). Штавише, потпуно морфолошки развијено микробиље садржи веома мало скроба, али висок садржај простих угљених хидрата (глукоза, фруктоза и сахароза) и растворљивих/нерастворљивих дијеталних влакана (Teng et al., 2021). Након фазе клијања и развоја котиледона, долази до појаве првих, а затим и других правих листова, а потом следи фаза бербе микробиља. Са друге стране, за разлику од микробиља, зрела биљка наставља свој развој користећи нутријенте и сунчеву енергију.



Слика 2.7. Фазе развоја микробиља (направљено у програму Biorender)

Иако на први поглед делује да између клица и микробиља не постоји велика разлика, она је ипак присутна. На **Слици 2.8** је дат сумарни приказ главних разлика и сличности између клица и микробиља. Наиме, прва уочљива разлика је везана за изглед – клице имају корен, стабло и котиледоне, док микробиље уз све то садржи и прве праве листове. Друга разлика лежи у погледу периода раста; код клица период раста траје свега неколико дана (око 7), док микробиље има нешто дужи период раста (1–3 недеље), па се самим тим јавља и разлика у величини (Gunjal et al., 2024). Клице расту у мраку уз присуство високе влажности и слабе вентилације, док је са друге стране за раст микробиља потребне светлост, влага и добра вентилација (Partar et al., 2023). Разматрајући делове биљке који су јестиви, клице су обично у целости јестиве укључујући корен, стабло, семе и младе котиледоне, док код микробиља корен и заостала семена након клијања нису за јело, за разлику од стабла, котиледона и првих/других правих листова који чине јестиве делове микробиља (Teng et al., 2021). Што се тиче сличности у захтевима за производњу клица и микробиља, код оба типа производа није неопходан велики простор за производњу и није неопходно користити пестициде и ђубрива (Partar et al., 2023). Још једна разлика, а уједно и предност микробиља, јесте та што микробиље, за разлику од клица, није повезано са болестима које се преносе храном (Riggio et al., 2019).

Главне разлике између микробиља и зрелих биљака јесу те што производња зрелих биљака зависи од сезоне, захтева велики простор за гајење и примену великих количина ђубрива и пестицида, као и велике количине светлости и воде, док се период раста креће од пар до неколико месеци и најчешће су само одабрани делови биљке јестиви, док остатак представља нуспроизвод (Bhaswant et al., 2023). Са друге стране, једно од главних ограничења микробиља и клица у односу на зреле биљке јесте кратак рок трајања после бербе након чега долази до сушења, губитка хранљивих материја и кварења (Bhatt et al., 2023). Узимајући у обзир све предности микробиља у односу на зреле биљке, може се непристрасно извући закључак да је један од главних покретача успешне производње микробиља појава вертикалне пољопривреде. Ова врста пољопривреде подразумева коришћење малог простора за производњу великих количина клица и микробиља, уз мале

захтеве у погледу воде и светлости, као и одсуство пестицида и ђубрива, што даје велику предност у производњи ових малих биљака у односу на производњу зрелих биљака.



	Клице	Микробиље
Морфологија	Корен, стабло и котиледони	Корен, стабло, котиледони и први прави листови
Период раста	Неколико дана (око 7)	1-3 недеље
Систем гајења	У води или у влажној средини; У систему без земљишта	У земљишту или алтернативним медијумима; Хидропоника, аеропоника и аквапоника
Специјални захтеви у вези гајења	Расту искључиво у мраку и у води	Захтевају присуство природног или вештачког осветљења, влажне средине и добре вентилације
Јестиви делови	Корен, стабло и котиледони	Стабло, котиледони и први прави листови
Захтевају употребу пестицида и ђубрива	НЕ	НЕ
Безбедност	Велики ризик од болести које се преносе храном	Мали ризик од болести које се преносе храном

Слика 2.8. Разлике између клица и микробиља

2.1.5. Микробиље као извор биоактивних једињења

Биоактивна једињења су једињења која имају доказану биолошку активност са познатим позитивним дејством на живи организам (Galanakis, 2017; Kussmann et al., 2023). Штавише, биоактивна једињења показују антидијабетске, антиканцерогене, антихипертензионе, нуеропротективне, антиинфламаторне, антиоксидативне, антивирусне и антимикробне активности (Karasawa & Mohan, 2018). Микробиље представља богат извор биоактивних једињења (секундарних метаболита), често у већим концентрацијама него што је њихов садржај у зрелом биљу (Mir et al., 2017). Клице и микробиље имају посебан значај у исхрани људи због садржаја различитих секундарних метаболита, пре свега фенолних једињења, беталаина, витамина, каротеноида, глукозинолата, аминокиселина и минерала, при чему присуство и садржај ових једињења зависи од врсте микробиља (Rouphael et al., 2021).

У науци се у последњих неколико деценија све више пажње посвећује секундарним метаболитима из различитих извора (најчешће биљних извора), са посебним освртом на антиоксидансе. Антиоксиданси имају важну улогу у људском организму јер неутралишу слободне радикале и на тај начин спречавају оштећења узрокована оксидативним стресом (Zhang et al., 2020). Наиме, да би се дошло до правилног поимања улоге и сврхе антиоксиданаса, неопходно је увести појам оксидативног стреса узрокованим слободним радикалима и његовог утицаја на биолошке системе. Оксидативни стрес се јавља у биолошким системима као комплексан процес при којем организам није у стању да уклони

слободне радикале помоћу ендогених антиоксиданаса (Francenia Santos-Sánchez et al., 2019). Са друге стране, слободни радикали, а нарочито реактивни кисеонични радикали (енгл. *Reactive Oxygen Species* – ROS) попут водоник-пероксида (H_2O_2) и супероксид радикал анјона ($O_2^{\cdot-}$), јављају се у организму услед упалних процеса, метаболичких поремећаја и утицаја спољашњих фактора (зрачење, дувански дим, загађеност ваздуха, токсини, стрес, алкохол, нездрава храна, итд.), узрокујући оштећење ћелија и појаву различитих хроничних болести, укључујући канцер, кардиоваскуларне болести, неуролошке болести итд. (Le et al., 2020). Да би се спречило прекомерно акумулирање ROS и последично настајање хроничних болести, људски организам има способност да антиоксидативним механизмима контролише оштећење ћелија помоћу ендогених антиоксиданаса као што су: супероксид дисмутаза, каталаза, глутатион пероксидаза, билирубин и албумин (Francenia Santos-Sánchez et al., 2019). У случају када организам не може сам да се одбрани од прекомерног акумулирања ROS, јавља се потреба за уносом егзогених антиоксиданаса путем хране или путем различитих суплемената (Francenia Santos-Sánchez et al., 2019). Егзогени антиоксиданси се могу класификовати на природне и вештачке при чему ће се у овом раду разматрати само природни антиоксиданси, са посебним фокусом на фенолна једињења, глукозинолате и беталаине. У овом случају, микробиље амаранта, цвекле и броколија може бити обећавајући извор антиоксиданаса (фенолна једињења, глукозинолати, беталаини итд.) и потенцијални суплемент/функционални додатак исхрани са широким применом.

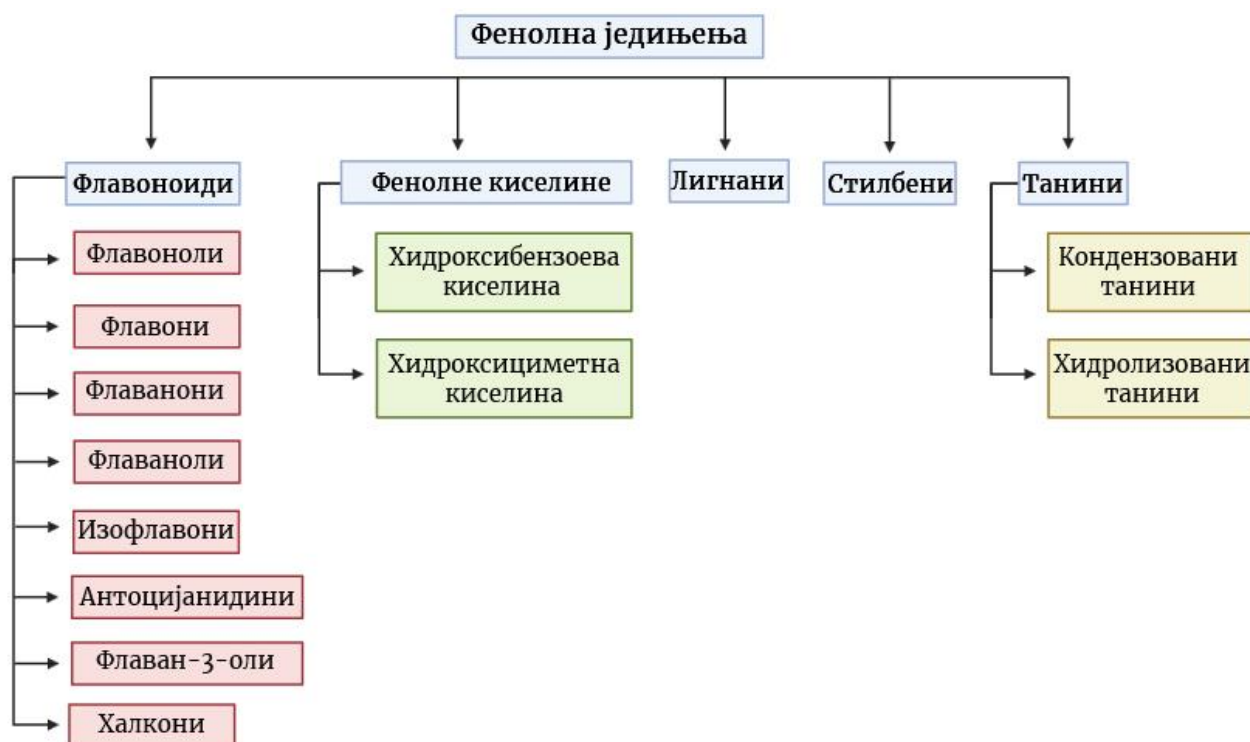
2.1.5.1. Фенолна једињења

Полифеноли представљају велику групу фитохемикалија са израженом антиоксидативном активношћу, и чиме помажу у превенцији различитих хроничних болести, укључујући кардиоваскуларне болести, дијабетес, канцер, старење, инфекције и астму (Pandey, 2009; Tsao, 2010). Као секундарни метаболити, полифеноли имају значајну улогу у механизмима заштите и одбране биљке од спољних фактора, па се тако њихова производња може подстаћи изазивањем различитих стресних стања током процеса клијања и раста (Galieni et al., 2020; Ebert, 2022).

У биљном ткиву полифеноли се најчешће јављају у форми агликона или гликозида (моно- или полисахариди) (Vuolo et al., 2019). Фенолна једињења имају једноставну структуру коју чине један или више ароматичних прстенова (бензенов прстен) за који су обично везани једна или више хидроксилних група (-ОН). Па стога, на основу броја хидроксилних група фенолна једињења се могу класификовати на:

- Монофеноле (имају само једну хидроксилну групу);
- Бифеноле (имају две хидроксилне групе) и
- Полифеноле (имају више хидроксилних група).

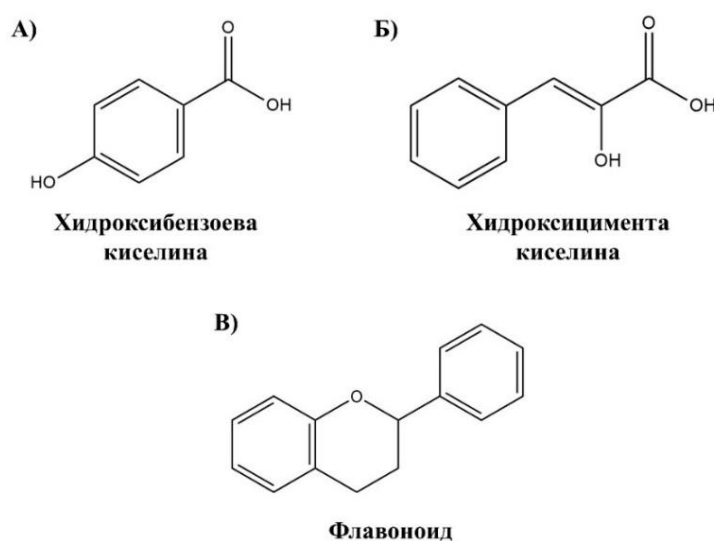
До сада је пронађено преко 8000 хиљада фенолних једињења изолованих из различитих биљака (Li et al., 2023). Постоји више подела фенолних једињења, а једна од најједноставнијих је она на **флавоноиде** и **нефлавоноиде** (Kalušević, 2017). У нефлавоноиде се убрајају фенолне киселине (деривати хидроксибензојеве и хидроксициметне киселине), лигнани и стилбени, док се флавоноиди могу даље класификовати на флавоноле, флавоне, флаваноне, изофлаване, антоцијанидине, и флаван-3-оле (Kumar et al., 2019; Shen et al., 2022; Marković, 2025) (Слика 2.9).



Слика 2.9. Подела фенолних једињења (направљено у програму Biorender)

Фенолне киселине представљају једне од најраспрострањенијих фенолних једињења и сачињене су од једног ароматичног прстена у којем је најмање један водоник замењен хидроксилном групом (Vuolo et al., 2019). У микробиљу се фенолне киселине најчешће јављају као деривати хидроксibenзоеве и хидроксициментне киселине, при чему њихова врста и количина зависе пре свега од биљне врсте (Kumar et al., 2019; Li et al., 2023).

Флавоноиди су секундарни метаболити биљака, воћа и поврћа који утичу на њихову боју, мирис и укус, односно органолептичке карактеристике (Dias et al., 2021). Хемијску структуру флавоноида чине два бензенова прстена повезана преко хетероцикличног пиранског прстена (Kumar & Pandey, 2013) (Слика 2.10).



Слика 2.10. Структурна формула хидроксibenзоеве (А), хидроксициментне (Б) киселине и флавоноида

Микробиле представља одличан извор фенолних једињења (Mir et al., 2017). Разматрајући количину биаоактивних једињења, укључујући састав и садржај фенолних једињења и глукозинолата, микробиле често садржи веће концентрације појединачних једињења из наведених класа него сродне зреле биљке (Partap et al., 2023). У раду Sun et al. (2013), у микробилу црвеног купуса, црвене слачице, љубичасте слачице, мизуне и љубичасте келерабе је идентификовано укупно 164 полифенолних једињења и њихових деривата, укључујући 30 антоцијана, 105 флавонол гликозида и 29 хидроксициментних киселина и деривата хидроксibenзоеве киселине. Горе наведена студија води ка закључку да микробиле које припада Brassica фамилији представља изразито богат извор различитих фенолних једињења, пре свега флавоноида и фенолних киселина. Друге студије долазе до истог закључка у погледу садржаја фенолних једињења; у раду Liu et al. (2022) испитиван је ефекат производње микробилја под различитим условима гајења и притом је идентификован велики број фенолних једињења у микробилу броколија и кеља. У наведеној студији су идентификовани кемпферол, кверцетин, изохрамнетин деривати, као и деривати хидроксицименте киселине. Микробиле (кељ, црвени купус, келераба и ротквица) које припада наведеној фамилији биљака потврђено је присуство 180 флавоноида (антоцијани, флаволи, флавоноли) и 68 фенолних киселина (хидроксициментна и хидроксibenзоева киселина) стилбена и лигнина (Tomas et al., 2021). Хетерогеност фенолних једињења у микробилу из породице Brassicaceae је такође потврђена и у студију García-Pérez et al. (2024), где је идентификовано присуство великог броја различитих класа фенолних једињења, са најзаступљенијим флавоноидима (165 једињења) и фенолних киселина (85 једињења), док су лигнани и стилбени били најмање заступљени. Даље, у врстама из фамилије Amaranthaceae, као што су цвекла и амарант, детектовани су цијанидин, катехин, кверцетин, лутеолин, сесамин, ферулинска киселина, ресвератрол и тирозол (Rocchetti et al., 2020), али када су ове врсте у питању још увек су неопходне студије које се баве карактеризацијом њихових биаоактивних једињења.

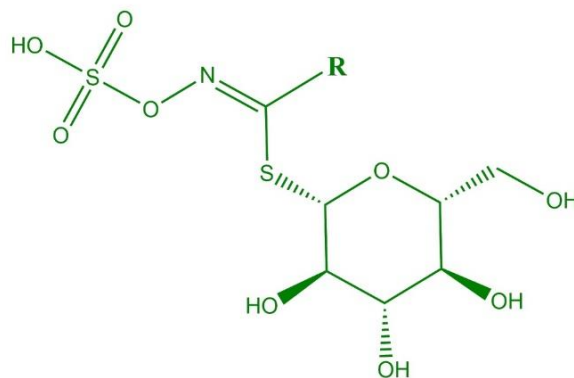
У студији спроведеној од стране Stajčić et al. (2024), микробиле цвекле је имало највећи садржај фенолних једињења у поређењу са осталим врстама микробилја, са доминантним присуством фенолних киселина. Pannico et al. (2022) објавили су фенолни профил микробилја индустријске конопље, врсте која се ретко узгаја у том облику, и откривено је да њено микробиле садржи велике количине флавоноида, као што су кемпферол, кверцетин, рутин, апиџенин и апиџенин-7-гликозид, мирицетин и катехин, док су међу фенолним киселинама највише биле заступљене ферулинска, кумаринска и хлорогена киселина. Истраживачима су пажњу привукле и ароматичне врсте микробилја због различитих и често биаоактивних компоненти. Анализирајући ароматичне врсте микробилја и њихов садржај биаоактивних компоненти, Pannico et al. (2020) су детектовали присуство различитих врста фенолних једињења у зависности од врста микробилја, укључујући хлорогену киселину и рутин у коријандеру, хексозид кафеинске киселине и кемпферол-3-О(кафеоил) софорозид 7-О-глукозид у кинеском купусу, и цихоринску и рузмаринску киселину у зеленом и љубичастом босиљку (Pannico et al., 2020). Такође, љубичасти и зелени босиљак имају висок садржај лутеолина, апиџенина и кверцетина (Kyriacou et al., 2019).

2.1.5.2. Глукозинолати

Поред полифенола, микробиле из породице Brassicaceae представља одличан извор глукозинолата (Teng et al., 2021), чије присуство у исхрани се одликује различитим бенефитима, укључујући и превенцију канцера (Abaajeh et al., 2023). Као секундарни метаболити, глукозинолати играју улогу у заштити биљке од инсеката и различитих патогена слично као фенолна једињења, а њихова биосинтеза може бити подстакнута различитим агрономским мерама (Zhang et al., 2020).

Основна структура глукозинолата састоји се од β -D-глюкопиранозне групе која је преко атома сумпора повезана са (Z)-N-хидроксиминосулфатним естром и променљивим

агликонским бочним ланцем (Hansch et al., 2012). Глукозинолати се на основу бочног ланца могу класификовати на алифатичне, хетероцикличне (индолне) и ароматичне глукозинолате (Zhang et al., 2020; Le et al., 2020). На **Слици 2.11** приказана је основна структура глукозинолата. Продукти разградње глукозинолата су изотиоцијанати, који често показују већу антиоксидативну активност него сами глукозинолати, а чија се структура одликује у присуству сулфоцијанатне групе ($\text{N}=\text{C}=\text{S}$) (Li et al., 2022). Изотиоцијанати се формирају након деловања ензима мирозиназе који долази у контакт са глукозинолатима у случају када је ткиво биљке оштећено и почиње да их трансформише у различите продукте разградње, међу којима настају и поменути изотиоцијанати (Teng et al., 2021). Такође, изотиоцијанати показују добар ефекат на људско здравље, укључујући превенцију различитих обољења (Le et al., 2020).



Слика 2.11. Основна структурна формула глукозинолата, где R означава различиту бочну групу која варира у зависности од врсте глукозинолата

Младе биљке и клице показују више концентрације глукозинолата од зрелих биљака исте врсте (Sanchez Maldonado et al., 2015). Највећи број глукозинолата је идентификован у врстама из фамилије Brassicaceae, чак 90 идентификованих глукозинолата (Teng et al., 2021; Ebert, 2022). Најзаступљенији глукозинолати у микробиљу броколија су: глукоиберин, глукорафанин, 4-хидроксиглукобрасицин, глукобрасицин, метоксиглукобрасицин, 1-метоксиглукобрасицин (Demir et al., 2023). У наведеној студији најзаступљенији су били алифатични глукозинолати (глукорафанин и глукоиберин), док су се од индолних издвојили 4-хидроксиглукобрасицин и глукобрасицин.

Микробиље броколија у поређењу са осталим врстама у оквиру исте фамилије садржи највишу концентрацију фенолних једињења и изотиоцијаната, чиме се постиже његово двојак дејство: антиоксидативно и антиканцерогено (Marchioni et al., 2021). Поврх тога, у студији Bafumo et al. (2024), су открили и квантификовали више од 10 глукозинолата у микробиљу руколе, броколија, купуса, карфиола, зелене мизуне, слачице, кинеског зеља (енгл. *pak choi*), ротквице, црвеног купуса, црвене мизуне, црвене слачице, кинеског купуса (енгл. *tat soi*), репе и поточарке. Међу детектованим једињењима су: 4-хидрокси глукобрасицин, 4-метоксиглукобрасицин, епипрогитрин, глукобрасицанапин, глукобрасицин, глукоеруцин, глукоиберин, глуконанин, глукорафанин, глукорафенин, глукосиналбин, неоглукобрасицин, прогитрин и синигрин. Највиши садржај изотиоцијаната такође је детектован у микробиљу броколија, нарочито сулфорафана. Додатна потврда да микробиље из фамилије Brassicaceae доминантно садржи глукозинолата јесте и студија коју су спровели Tomas et al. (2021), у којој су идентификована 22 глукозинолата (најзаступљенији су глуконанин, глукорафанин, глукобрасицин и 4-хидроксиглукобрасицин) у микробиљу келџа, црвеног купуса, келерабе и ротквице. Поред тога, Alrifai et al. (2021) и Castellaneta et al. (2022) су детектовали 13 од 27 глукозинолата у микробиљу из исте

фамилије. Варирање у садржају глукозинолата доказано је и између различитих генотипова истих врста микробиља (Di Bella et al., 2021).

Demir et al., 2023 покушали су да применом вештачког осветљења уместо сунчеве светлости изврше акумулацију глукозинолата у микробиљу роткице, броколија и купуса и дошли до закључка да се применом различитог осветљења утиче на садржај глукозинолата. Поред тога, третмани са CaCl_2 пре бербе и третмани УВБ (ултравиолетно зрачење) (енгл. UVB-ultraviolet) зрачењем после бербе такође су утицали на повећање садржаја глукозинолата (Sun et al., 2015; Lu et al., 2018; Lu et al., 2021).

2.1.5.3. Минерали

Минерали представљају веома значајне конституенте у људској исхрани који утичу на људско здравље и нормално функционисање организма, а најчешће се добијају из хране (Xiao et al., 2016). На основу потреба људског организма, минерали се могу класификовати на макроминерале (макроелементе) које је неопходно унети у већим количинама, и микроминерале (микроелементе) чија је потреба за уносом доста нижа (Ali, 2023). У макроелементе спадају Ca, Mg, P, K и Na, док се у микроелементе убрајају елементи као што су Fe, Zn, Cu и Mn (Xiao et al., 2016). Генерално, минерали имају различите улоге у метаболичким процесима, а њихов недостатак често може узроковати метаболичке проблеме са здрављем, који се манифестују кроз настанак остеропорозе, анемије, слабости мишића, хормоналних поремећаја итд. (Ali, 2023). Стога се препоручује оптималан унос минералних материја са балансираном исхраном што би омогућило нормално функционисање организма (Ali, 2023). Недостатак минерала у биљкама директно утиче на људску исхрану, будући да су биљке главни извори ових елемената, па се препоручује коришћење различитих ђубрива како би се акумулирао виши садржај минералних материја у биљкама (Nieder et al., 2018).

Микробиље поред високог садржаја секундарних метаболита садржи и значајне количине минерала (Partap et al., 2023). Xiao et al. (2016) су анализирали садржај минералних материја у тридесет врста микробиља из Brassicaceae фамилије и утврдили високе концентрације макроелемената као што су: калијум, фосфор, калцијум, магнезијум, и натријум, док су од микроелемената били најзаступљенији гвожђе и цинк. Посебно је занимљиво да у овој студији нису били детектовани тешки метали, као што су кадмијум и олово. de la Fuente et al. (2019) су идентификовали макро- и микроелементе у микробиљу броколија, кеља, црвене слачице и роткице гајеном у хидропоници и открили високе садржаје макроелемената (K, Ca, Mg) и микроелемената (Fe, Zn). Микробиље цвекле је показало виши садржај селена, хрома и бакра у поређењу са одраслом биљком цвекле, док микробиље амаранта има виши садржај бакра (Johnson et al., 2021). У студији коју су спровели Pinto et al. (2015) утврђено је да микробиље зелене салате има виши садржај макро- и микроелемената (Ca, Mg, Fe, Mn, Zn, Se и Mo) у поређењу са зрелом салатом, док има нижи садржај нитрата који потенцијално могу узроковати здравствене проблеме. Горе наведене чињенице дају велику предност коришћења микробиља у односу на одрасле биљке, будући да микробиље са једне стране утиче на повећан унос минерала у исхрани човека, док са друге стране смањује унос штетних материја. Што се тиче других биљних врста и микробиље целера има вишу концентрацију одређених макроелемената (N, P, Ca, Na и S) у односу на ону детектовану у зрелим листовима (Singh et al., 2023). Концентрација калијума и цинка у микробиљу цвекле, амаранта, ротквице и осталих испитиваних врста била је значајно виша у поређењу са одраслим биљкама истих врста у студији коју су спровели Yadav et al. (2019). Минерални састав и концентрација минералних материја у великој мери зависе од врсте микробиља (Di Gioia et al., 2023), што су показали Newman et al. (2021). Поједине врсте микробиља, као што је оно од броколија, садрже висок садржај Ca, што их чини одличним извором овог минерала (Paradiso et al., 2018; Teng et al., 2021). Kyriacou et al. (2019) анализирали су садржај минералних материја у појединим врстама биљака из фамилије Brassicaceae, Chenopodiaceae, Lamiaceae, Malvaceae и Apiaceae и показали висок садржај

макроелемената фосфора, калијума, сумпора, калцијума, магнезијума и натријума, као и да њихов садржај зависи од врсте микробилја.

2.1.5.4. Витамини

Витамини представљају врло важне органске молекуле који имају значајну улогу у нормалном функционисању човековог организма и одржавању доброг здравља (Dereje et al., 2023), док њихов дефицит у човековом организму узрокује озбиљне здравствене проблеме (Amir Maqbool et al., 2017). Витамини се могу класификовати на растворљиве у води и оне растворљиве у мастима, односно на хидросолубилне и липосолубилне (Dewangan & Bhatia, 2023). Услед немогућности синтетисања великог броја витамина од стране људског организма, неопходно је уносити их путем хране, а нарочито из биљних извора (Fitzpatrick et al., 2012). Микробилје представља одличан извор ових есенцијалних молекула чак више него у зрелим биљкама, при чему њихов садржај у микробилју зависи од врсте микробилја, технологије гајења и третмана након бербе (Xiao et al., 2012). Штавише, микробилје се показало као изузетан извор витамина А, Е, С и К (Dereje et al., 2023). Према истраживању које су спровели Xiao et al. (2012), у 25 врста микробилја је анализиран садржај неколико кључних витамина, као што су витамин Е, витамин С и витамин К. Резултати су показали да микробилје садржи високе концентрације витамина, нарочито витамина С, пре свега у микробилју амаранта, црвеног купуса, ротквице и босиљка, док витамина Е, и то у облику α -и γ токоферола, има у специјалним врстама ротквице (енгл. *green daikon radish*). Витамин С делује као антиоксиданс и потребан је људском организму за нормално функционисање и здрав имунитет, а синтетише се само у биљкама (Dereje et al., 2023). Са друге стране, велика заступљеност витамина К, битног у процесу коагулације крви у људском организму, откривена је у скоро свим врстама микробилја, а нарочито у микробилју амаранта, кисељака, босиљка, грашка и црвеног купуса (Xiao et al., 2012; Teng et al., 2021). Знатно више количине витамина С и α -токоферола пронађене су у врстама микробилја у поређењу са зрелим биљкама истих врста, док са друге стране имају низак садржај антинутритивних материја (оксалата) (Ghoora et al., 2020). Спанаћ, хибискус и пискавица су врсте микробилја које су се издвојиле јер имају висок садржај наведених витамина, нарочито витамина С, чији је садржај био упоредив са познатим изворима високог садржаја овог витамина, као што је цитрусно воће (Ghoora et al., 2020). Када је у питању садржај витамина С, незаобилазан извор представља и микробилје из фамилије Brassicaceae. Наиме, у истраживању од стране Xiao et al. (2019) највиши садржај овог витамина је пронађен у микробилју карфиола и броколија, и то чак неколико пута виши од оног у зром поврћу исте врсте. Додатно, наведена стидија је испитала и садржај витамина К у микробилју и пронашла да су највише количине овог витамина присутне у микробилју рапинија, затим микробилју броколија, кеља, ротквице и љубичасте келерабе. Студија de la Fuente et al. (2019) је показала нешто другачије резултате, са највишом концентрацијом витамина С у микробилју кеља, након којег је следило микробилје броколија, ротквице и слачице (de la Fuente et al., 2019).

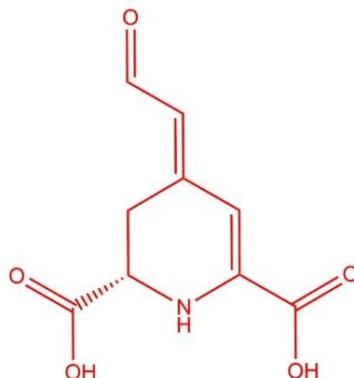
Занимљиво је да садржај витамина у микробилју варирају у зависности од врсте, као и да количина одређених витамина може бити чак 40 пута већа у микробилју, него у одговарајућем поврћу исте врсте (Dereje et al., 2023). Високи садржаји β -каротена и витамина А, В₅ и С су нађени у микробилју ротквице, купуса, и броколија, док микробилје цвекле представља богат извор витамина Б комплекса, као што су В₂, В₃ и В₅ (Rani et al., 2024).

Вреди напоменути да садржај витамина у микробилју може бити регулисан различитим условима производње микробилја, па се стога и фокус будућих истраживања базира на испитивањима како различити начини и технологије гајења утичу на садржај ових вредних органских молекула. Тако су на пример Tan et al. (2020) у микробилју броколија који је гајен у земљишту потврдили виши садржај витамина С, у поређењу са оним гајеним у условима хидропоније. Поред тога, применом различитог извора светлости и подешавањем

њихове јачине такође се може утицати на количину одређених витамина (Samuolienė et al., 2019).

2.1.5.5. Беталаини

Беталаини су хидросолубилни пигменти добијени од беталаминске киселине која се биосинтезира из аминокиселине L-тирозин (Соу-Barrera, 2020). Хемијска структура беталаминске киселине је приказана на **Слици 2.12**.



Слика 2.12. Основна структура беталаминске киселине

Беталаини се класификују на бетацијанине и бетаксантине (Steglich & Strack, 1990). Ови пигменти се најчешће налазе у биљкама из породица Aizoaceae, Amaranthaceae, Basellaceae, Cactaceae, Caryophyllaceae, Chenopodiaceae, Nyctaginaceae, Phytolaccaceae и Portulacaceae (Hussain et al., 2018). Постоји само неколико јестивих извора беталаина у које се убрајају цвекла, полегла опунција, питаја и блитва. Поред зреле цвекле, и њено микробиље садржи високе концентрације беталаина који дају црвену боју стаблу (Acharya et al., 2021; Yang et al., 2021).

Поред атрактивне боје, беталаини се одликују и високом антиоксидативном активношћу, много већом од аскорбинске киселине, рутина, катехина и антоцијана, а такође је забележено и њихово антиканцерогено и антиинфламаторно дејство (Hussain et al., 2018; Acharya et al., 2021). Са друге стране, један од највећих недостатака овог црвеног пигмента је његова брза деградација током складиштења на собној температури (Yang et al., 2021).

Постоји само неколико студија које су одређивале садржај беталаина и то на микробиљу цвекле и амаранта, применом спектрофотометријских и хроматографских метода. Rocchetti et al. (2020) су идентификовали различите облике бетацијанина и бетаксантина, укључујући валин-бетаксантин, аспарагин-бетаксантин, леуцин-бетаксантин, фенилаланин-бетаксантин, 3-метокситирамин-бетаксантин, триптофан-бетаксантин, 2-декарбокси-необетанин и бетанин/изобетанин. У истраживању Stajčić et al. (2024) је урађено спектрофотометријско одређивање укупног садржаја беталаина на микробиљу цвекле и утврђено је да наведено микробиље представља богат извор ових пигмената. Штавише, ово микробиље је показало највећу антиоксидативну активност у односу на друге врсте микробиља захваљујући високом садржају фенолних једињења, хлорофила и већ поменутих беталаина. Acharya et al. (2021), су дошли до сазнања да релативно висока антиоксидативна активност микробиља цвекле потиче од укупног садржаја беталаина, који су били виши од укупног садржаја фенолних једињења. Повећана антиоксидативна активност у микробиљу цвекле резултат је повећане акумулације фенолних једињења и беталаина, како је наведено у студију Hernández-Adasme et al. (2023). Поред микробиља цвекле, овим пигментима је богато и микробиље амаранта. У том контексту је посебно битно напоменути да третирање микробиља амаранта витамином B₁₂ утиче на повећање садржаја беталаина (Suparvanich et al., 2020).

2.1.6. Здравствени бенефити коришћења микробиља

Бројна истраживања су редовно конзумирање микробиља и његових производа довела у везу са бројним здравствених бенефитима (Zhang et al., 2021; Teng et al., 2021; Jambor et al., 2022; Bhaswant et al., 2023; Dereje et al., 2023; Rizvi et al., 2023; Gunjal et al., 2024). Микробиље има добро познате антиканцерогене, антимикробне, антиоксидативне, антигојазне, антиинфламаторне, антидијабетске и друге карактеристике које утичу позитивно на здравље човека (Rizvi et al., 2023). Генерално, здравствена корист од коришћења микробиља је директно повезана са присуством и количином биоактивних компонената у њему (Partap et al., 2023). До сада су здравствени бенефити конзумације микробиља потврђени на ћелијским линијама и експериментима на животињама, али на људима експерименти до сада нису рађени.

Сок од микробиља броколија је коришћен у истраживању Li et al. (2021) у циљу испитивања утицаја наведеног сока на спречавање развоја гојазности код експерименталних мишева. Резултати наведене студије наглашавају позитиван ефекат коришћења сока од микробиља броколија на спречавање развоја гојазности, повећања антиоксидативног капацитета јетре и смањења акумулације масти у јетри, па се стога може окарактерисати као новом функционалном храном која има позитиван ефекат у спречавању гојазности. de la Fuente et al. (2020) су закључили да микробиље одабраних биљних врста (броколи, слачица, кељ и ротквица) унесено у оквиру избалансираних исхрана може утицати на смањење рака дебелог црева. У наведеној студији коришћене су биодоступне фракције микробиља из породице Brassicaceae, како би се испитао њихов ефекат на канцерогене ћелије дебелог црева (Caco-2) у циљу процене потенцијала за индукцију апоптозе. Добијени резултати указују да микробиље ових врста има изузетан антипролиферативни ефекат на развој рака дебелог црева. Добра активност узорака микробиља броколија према Caco-2 ћелијама, може се објаснити чињеницом да биоактивна једињења микробиља после *in vitro* дигестије имају високу биодоступност (de la Fuente et al., 2019). Штавише, високи садржај биоактивних једињења и висока антиоксидативна активност микробиља амаранта и цвекле након *in vitro* дигестије, такође указује на могуће здравствене бенефите њиховог конзумирања (Rocchetti et al., 2020). Студија коју су спровели Ma et al. (2022) је показала да храњење експерименталних мишева лиофилизованим микробиљем броколија има хипогликемијски ефекат, као и да повољно утиче на липидни статус крви, антиоксидативне индикаторе и ниво инфламаторних фактора у јетри. Истраживање Nakakaawa et al. (2025) на лабораторијским пацовима коришћењем етанолног екстракта микробиља врсте *Brassica carinata* показало је антидијабетски ефекат, а тиме и потенцијал за лечење дијабетеса типа 2. Такође, у истраживању од стране Aly et al. (2023) утврђено је да исхрана са укључењем микробиља александријске детелине утиче на смањење глукозе у крви пацова са дијабетесом, смањење инсулинске резистенције, као и да долази до побољшања функције јетре и бубрега. Ови резултати су у сагласности са њиховом претходном студијом, где је уочено да микробиље ротквице и детелине има потенцијал за коришћење у превенцији дијабетеса, као и да ублажује симптоме хипергликемије (Aly et al., 2020). Помоћу мрежне фармакологије, коришћењем различитих модела и симулације дошло се до закључка да микробиље коријандера може потенцијално бити коришћено у терапеутске сврхе за лечење и превенцију дијабетеса (Zhong et al., 2025). Применом истог алата испитивана је и примена микробиља броколија у циљу потенцијалног терапеутског утицаја на канцер простате (Wijaya et al., 2025). Резултати студије наводе да микробиље броколија садржи биоактивна једињења са потенцијалним фармаколошким значајем за рак простате, али да су неопходни експерименти на ћелијама рака простате или студија на експерименталним животињама да би се то и потврдило. Генерално, микробиље кеља и ротквице показује антиоксидативна, антипролиферативна, неуропротективна, антидијабетска, антихипертензиона и антиинфламаторна својства. Микробиље кеља је показало антиинфламаторна ефекте, а микробиље ротквице антипролиферативни потенцијал (Vučetić et al., 2025).

Постоје и истраживања која испитују да ли конзумирање микробиља може да смањи токсични ефекат афлатоксина. Mohamed et al. (2023) су користили је микробиље ротквице у исхрани лабораторијских пацова третираних афлатоксином и дошла до сазнања да употреба микробиља у исхрани пацова доводи до смањења глукозе у серуму, побољшања параметара функције јетре и бубрега, побољшање хистопатологије панкреаса, јетре и бубрега, као и побољшања параметара оксидативног стреса. Слична запажања су уочена и када су пацови храњени микробиљем јечма, сугеришући да укључивање микробиља у исхрану може да контролише дијабетес мелитус, сузбија оксидативни стрес и доприноси смањењу нефропатију и неуропатију (Mohamed et al., 2022). Микробиље пискавице у истраживању Wadhawan et al. (2018) такође је показало антидијабетски потенцијал, а употребом микробиља индијске слачице доприноси спречавање развоја канцера дојке и јетре (Saengha et al., 2021). Такође, водени екстракти микробиља грашка, соје, ротквице, специјалне врсте ротквице (енгл. *red rambo radish*) и руколе значајно су смањили пролиферацију ћелија, а тиме и развој тумора (Truzzi et al., 2021). Истраживања спроведена од стране Kaimuangprak et al. (2022) и Kaimuangprak et al. (2025) указују да микробиље ротквице има потенцијални антиканцерогени ефекат, укључујући спречавање развоја канцера дебелог црева и јетре. Постоје и студије које потврђују антиинфламаторни ефекат екстракта микробиља (Marotti et al., 2021). У истраживању Drozdowska et al. (2020) је, поред одређивања биоактивних једињења и антиоксидативне активности, доказано да сок од микробиља црвеног купуса има антиканцерогени ефекат смањујући пролиферацију ћелија рака, чак више него сок од зрелог црвеног купуса. Конкретно, у другој студији наведених аутора је утврђено да сок од микробиља црвеног купуса инхибира пролиферацију ћелија рака простате, вероватно због садржаја биоактивних једињења са добро познатом антиканцерогеном активношћу (Drozdowska et al., 2021). Слична запажања и резултати повезани са антипролиферативним и апоптичким ефектима на ћелијским линијама канцера дојке су известили Piasna-Słupecka et al. (2023) применом сока од микробиља цвекле.

Када су у питању кардиоваскуларне болести, резултати студије Huang et al. (2016) су показали да коришћење микробиља црвеног купуса у исхрани лабораторијских пацова потенцијално може утицати на заштиту од настанка кардиоваскуларних болести, спречавањем хиперхолестеролемије. Исхрана у којој је укључено микробиље може утицати на смањење репродуктивних поремећаја код пацова изазваних дијабетесом и афлатоксином, као што је забележено у студији Khatlab et al. (2022). У наведеној студији коришћено је микробиље јечма (*Hordeum vulgare* L.) којим су храњене мушке јединке пацова и утврђено је да повећањем учешћа микробиља јечма у њиховој исхрани долази од смањења оксидативног стреса, повећања броја сперматозоида, као и смањења морфолошких абнормалности сперматозоида и хромозомске аберације у поређењу са пацовима храњеним без учешћа микробиља. Иако о утицају микробиља на спречавање запаљења нервног система до сада нема литературних података, екстракти клица броколија обogaћени сулфорафаном показали су ефекте против запаљења нервног система и амнезије код мишева (Subedi et al., 2019).

Поред бројних здравствених предности употребе микробиља у добро избалансираној исхрани, микробиље се одликује и антимикробним својствима, такође повезаним са корисним ефектима на људско здравље и имунитет (Le et al., 2020). Постоје студије које су се бавиле антимикробним ефектом клица броколија, а које су повезане са садржајем глукозинолата као једињења које спречавају раст бактерије *Helicobacter pylori* (Moon et al., 2010) и фенолних једињења за успоравање раста патогених бактерија попут *Staphylococcus aureus* и *Salmonella Typhimurium* (Le et al., 2019). Разматрајући антимикробна својства микробиља, Rizvi et al. (2025) су показали да екстракти микробиља цвекле, слачице и ротквице имају антимикробну активност против патогених Грам-негативних (*P. aeruginosa*, *K. pneumonia*, *E. coli*) и Грам-позитивних бактерија (*S. aureus*). У истој студији је утврђено да екстракт микробиља цвекле има највећу антимикробну активност према Грам-негативним бактеријама, а екстракт микробиља ротквице према Грам-позитивним бактеријама.

Микробиле врсте *Pennisetum glaucum* показало је антимикробну активност према патогеним бактеријама (Sharma & Gupta, 2021). Када су у питању микробиле келја и црвеног спанаћа, такође је утврђена антимикробна активност према неколико врста патогених бактерија, чак више од зрелог поврћа истих врста, чиме може потенцијално служити као замена за синтетичке антимикробне материје у конзервисању хране (Shamlan et al., 2020). Такође, микробиле келја и ротквице (енгл. *Sango radish*) показале су одличну антимикробну активност према патогеним бактеријама, укључујући *Escherichia coli* и *Staphylococcus aureus* (Vučetić et al., 2025). Екстракти микробила пискавице су показали антимикробну активност која се огледа у инхибицији раста патогених микроорганизама, као што су *Aeromonas hydrophila*, *Pseudomonas aeruginosa* и *Staphylococcus aureus* (Jayaraman & Ramasamy, 2024).

2.1.7. Примена микробила у производњи прехранбених производа

Хладно цеђени сокови припадају категорији висококвалитетних сокова, који се поред присуства хранљивих и биоактивних материја одликују и високим садржајем ензима (Biancaniello et al., 2018; Gómez-Gaete et al., 2024). Најчешћа асоцијација на термин „сокови“ јесу сокови произведени од воћа са освежавајућим сладуњавим воћним укусом, док са друге стране сокови произведени од различитих врста поврћа имају не тако примамљив укус, али представљају богат извор већ поменутих биоактивних компонената, првенствено антиоксиданаса (Wootton-Beard et al., 2011). Сокови који се добијају поступком хладног цеђења имају најбољи квалитет због минималног утицаја топлоте на компоненте у соку, али самим тим имају и краatak рок трајања, па се морају конзумирати у периоду од неколико дана у случају да после цеђења изостане пастеризација или неки од других савремених третмана за продужење рока трајања сокова (Biancaniello et al., 2018). Процес добијања сокова у великој мери утиче на садржај биоактивних компонената; конкретно, сокови добијени поступком хладног цеђења имају виши садржај укупних фенолних једињења у односу на сокове добијене помоћу центрифугалних соковника (Lee et al., 2013). Конзумирањем хладно цеђених сокова од поврћа постиже се унос високих концентрација биоактивних једињења, што има позитивна дејства на здравље конзумента, попут антиинфламаторних, антимикробних и антиканцерогених ефеката (Lan et al., 2023). Сокови од микробила садрже биоактивна једињења и могу да буду извор хранљивих материја и биоактивних молекула у људској исхрани, па се стога и најчешће користе као додаци у процесу производње хране и сокова, чиме се шири свест о њиховим добробитима и расте њихова доступност потрошачима (Senthilnathan & Muthusamy, 2021). Анализе сродних производа, попут сокова од пшеничне траве, показале су високе концентрације биоактивних једињења, између осталог и хлорофила, са добро познатим ефектима на људско здравље (Özköse et al., 2016). До сада су се сокови од микробила користили само као мешавина сокова од воћа и поврћа у циљу обогаћивања сокова од воћа и поврћа биоактивним компонентама, а последично и за добијање функционалних сокова (Sharma et al., 2020; Senthilnathan & Muthusamy, 2021; Sharma et al., 2021; Senthilnathan & Muthusamy, 2022). На основу прегледа литературе може се закључити да су истраживања које се баве коришћењем микробила броколија, цвекле и амаранта у производњи хладно цеђених сокова веома оскудна. Стога, у овој докторској дисертацији један од циљева представља производња и карактеризација хладно цеђених сокова од микробила наведених врста.

Поред сокова, пекарски производи представљају добар матрикс за инкорпорацију екстраката или фино уситњених прахова микробила (функционалних састојака) у циљу развоја нових потенцијално функционалних производа. На пример, лиофилизовани узорци микробила пшеничне траве, пискавице и босиљка укључени су у формулацији функционалних мафина (Kumar & Singh, 2024). Инкорпорација ових прахова у мафинима је повећала садржај протеина, пепела, дијететских влакана и фенолних киселина, док је сензорна прихватљивост зависила од врсте икорпорираниог праха и била је боља код узорака обогаћених праховима пшеничне траве и босиљка у поређењу са мафинима са пискавицом.

Пораст броја особа интолерантних на глутен је узроковао и пораст развоја безглутенских производа. У истраживању Mansouri et al. (2024) коришћен је осушени прах микробиља сунцокрета за инкорпорацију у безглутенски кекс. Додатак праха утицао је на повећање садржаја фенолних једињења, антиоксидативне активности, минерала, протеина, масти и влакана припремљених кексова. Међутим, додатак од 8% праха микробиља сунцокрета имао је задовољавајући утицај на сензорни квалитет и прихватљивост производа од стране потрошача, премда је уочено повећање тврдоће кексова током складиштења. Поред наведеног, лиофилизован прах од микробиља мунго пасуља и пшеничне траве коришћен је за инкорпорацију у безглутенске пшеничне мафине без јаја, што је резултовало повећањем садржаја биоактивних једињења, антиоксидативних својстава, протеина и дијететских влакана (Kaur et al., 2022).

Микробиље је као нови извор протеина и биоактивних једињења искоришћено и у производњи резанаца (John et al., 2025). Конкретно, прашови од микробиља чије су у одређеним количинама инкорпорирани у резанце, доприносећи високом садржају протеина, минерала и фенолних једињења у резанцима. Када је у питању сензорна прихватљивост, учешће праха од микробиља чије до 5% се сматрало сензорно прихватљивим, док је веће учешће имало нежељене ефекте на боју и текстуру. Инкорпорација праха микробиља ротквице (енгл. radish sango) у млечни производ сличан јогурту (*lassi*) обогатио је јогурт флавоноидима, антоцијанима и витамином С, док је припремљени производ био веома прихватљив од стране потрошача (Gunjal et al., 2025). Такође, прах од микробиља се може користити и за формулацију чатни зачина, при чему посебно велики потенцијал има микробиље које садржи бојене материје (Devi et al., 2023). С тим у вези, у истраживању Freitas et al. (2024) показали су да микробиље цвекле поседује потенцијал за изолацију природне боје која се даље може применити у индустрији, због присуству беталаина. Друга истраживања наводе да се микробиље може инкорпорирати у хлеб и да тиме потенцијално може обогатити хлеб биоактивним једињењима, пружајући позитивне ефекте по људско здравље (Klopsch et al., 2018).

Посебно се истиче могућност примене микробиља у формулацији кисело-млечних производа као што је јогурт. Јогурт представља један од најпопуларнијих млечних производа широм света због својих хранљивих и органолептичких својстава (Šeregelj et al., 2021). Природни функционални састојци се често додају у јогурт у виду свежег воћа, свежег поврћа, осушених производа и производа у праху, а све у циљу повећања његове биолошке активности (Rashwan et al., 2023). Биоактивни састојци који се додају у јогурт најчешће поред позитивних ефеката на здравље људи утичу и на спречавање раста патогених микроорганизама у финалном производу. У раду аутора Sadeghi et al. (2017) показано је да додатак екстракта клица броколија у пробиотском јогурту има инхибиторно дејство према *Helicobacter pylori* са једне стране, док са друге стране не утиче негативно на раст пробиотских бактерија. Обогаћивање јогурта екстрактима и инкапсулатима цвекле такође утиче на повећање функционалних својстава финалног производа (Flores-Mancha et al., 2021).

Занимљиво је да се микробиље испитује и за примену у свемирским мисијама како би се посади обезбедила довољна количина фитонутријената који би их потенцијално штитили од штетних појава узрокованих боравком у свемирском простору (Kyriacou et al., 2017). С тим у вези, Америчка свемирска агенција (енгл. NASA) спровела је истраживања о потенцијалном коришћењу микробиља у условима микрогравитације, као и начине на који ће се микробиље брати (сећи) у оваквим условима (Teng et al., 2023) (Слика 2.13). На избор микробиља за гајење у свемирском условима утицао је пре свега његов веома кратак период раста, скромни захтеви за простором, нутријентима и водом, као и микробиолошка безбедност (Kyriacou et al., 2017). Са друге стране, гајење микробиља у условима микрогравитације има ограничења по питању конвекције ваздуха, узрокујући отежану размену топлоте, влаге и гасова између биљке и околине, наводњавања биљака и, на крају,

негативног утицаја на физиологију биљака и микроорганизама (Teng et al., 2023). Иако постоје одређене потешкоће у производњи микробиља у симулираном свемирском простору у циљу исхране астронаута, микробиље и даље има велики потенцијал за коришћење у ове сврхе.



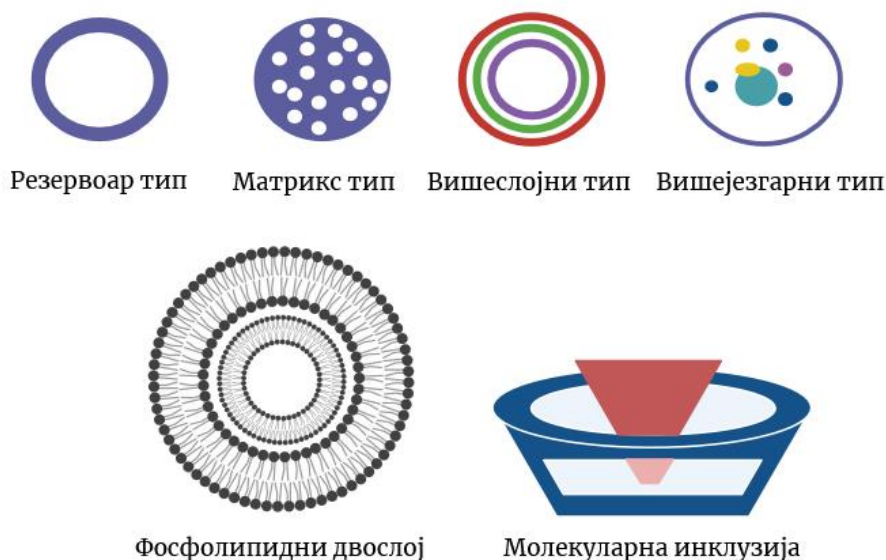
Слика 2.13. Гајење микробиља у условима микрогравитације од стране NASA
(преузето са: <https://science.nasa.gov/science-research/science-enabling-technology/how-do-you-harvest-microgreens-in-microgravity/>)

2.2. ИНКАПСУЛАЦИЈА

2.2.1. Појам инкапсулације

Почетак процеса инкапсулације датира још из 19. века, када је једна од најзначајнијих метода инкапсулације, спреј сушење, први пут патентирана од стране Samuel Percy-ја 1872. године за конзервисање и повећање стабилности хранљивих материја из млека (Sobel et al., 2014). Временом је примат у процесу инкапсулације преузела фармацеутска индустрија производећи тврде желатинозне капсуле за паковање различитих лекова, као начин заштите активних супстанци од спољашњег утицаја (Sobel et al., 2014). Данас, инкапсулацију користи велики број индустријских процеса, укључујући пре свега прехранбену и фармацеутску индустрију, затим хемијску и текстилну индустрију и медицину (Fu & Hu, 2017; Xu et al., 2024). Под појмом инкапсулација подразумева се термин који означава процес у коме се једна компонента „заробљава“ унутар друге компоненте (Zuidam & Shimoni, 2010). У том смислу компонента која се заробљава назива се активна компонента, а компонента која је заробљава се назива носач. Тачније речено, процес инкапсулације подразумева поступак где се активне компоненте смештају унутар структуре одређеног носача, стварајући систем активна компонента/носач (Lević, 2014). Такав систем у коме је активна компонента смештена или заробљена унутар одређеног носача се назива инкапсулат (Zuidam & Shimoni, 2010, Lević, 2014). Велика предност инкапсулације се огледа у томе што је активна компонента потпуно обложена носачем и на тај начин одвојена од спољашње средине, притом не мењајући својства активне компоненте у носачу (Fu & Hu, 2017). Заштита биоактивних компонената од спољних фактора као што су светлост, температура, кисеоник, влага, затим маскирање непријатних укуса и мириса и спречавање испаравања испарљивих једињења, представљају главне предности употребе процеса инкапсулације (Comunian & Favaro-Trindade, 2016).

Важно је напоменути да се, у зависности од примењене технике инкапсулације, могу произвести две форме честица, и то „матрикс“ форма и „резервоар“ форма честица (Lević, 2014). Резервоар форма честица подразумева да се активна компонента налази окружена носачем, док је код „матрикс“ форме честица активна компонента расута унутар носача, али такође и на површини честице (Lević, 2014). Генерално, обе форме честица које се добијају процесом инкапсулације имају велику примену у прехранбеној индустрији, а посебно за контролисано ослобађања активних компоненти у храни (Comunian & Favaro-Trindade, 2016). На **Слици 2.14**, су поред матрикс и резервоар типа честица, приказани и други типови инкапсулата, укључујући вишеслојни тип, вишејезгарни тип, фосфолипидни двослој и инкапсулати на бази молекуларне инклузије (Đorđević et al., 2014).



Слика 2.14. Графички приказ различитих врста инкапсулата који се добијају различитим инкапсулационим техникама (направљено у програму Biorender)

Ако узмемо у обзир величину честица инкапсулата добијених микроинкапсулацијом, пречник честица од 1-1000 μm означава микрочестице, које се најчешће користе у широкој лепези различитих индустрија (Fu & Hu, 2017). Са друге стране, инкапсулати пречника мањих од 1 μm називају се наночестицама, које се добијају наноинкапсулацијом (Arenas-Jal et al., 2020). Независно од величине честица, инкапсулацијом се могу произвести различити облици честица, укључујући сферни облик, цилиндрични облик и различите неправилне облике (Zuidam & Shimon, 2010; Arenas-Jal et al., 2020). Величина честица и њихова хомогеност је од велике важности када је у питању добра конзистенција производа, па с тим у вези расподела величина честица треба да буде што ужа (Timilsena et al., 2020).

Коришћење биоактивних компонената у производњи хране је ограничено због њихове осетљивости на технолошке процесе и амбијенталне услове током производње и складиштења, што узрокује њихову деградацију или губитак функционалних својстава (Piñón-Balderama et al., 2020). Решавање овог проблема се тражи континуирано све до данас, а једно од технолошких решења овог проблема може бити процес инкапсулације. Инкапсулација је нашла велику примену у индустрији хране, конкретно за контролисано отпуштање и унапређење стабилности биоактивних једињења у прехранбеним производима (Shahidi & Han, 1993). Наиме, у циљу контролисаног отпуштања активне компоненте у матрикс хране, процес инкапсулације обухвата неколико главних фаза (Shahidi & Han, 1993):

1. Инкапсулирање активне компоненте формирањем слоја носача око ње;
2. Држање активне компоненте унутар носача обезбеђује и штити активну компоненту од различитих фактора спољне средине;
3. Као и циљано, односно контролисано отпуштање активне компоненте у жељени матрикс хране у право време са контролисаном брзином ослобађања.

Процес инкапсулације има примену и у маскирању непријатних укуса и арома биоактивних компонената, као што је то случај са фенолним једињењима које одликује опор и горак укус (Nedović et al., 2011). Сировине које су богате фенолним једињењима и пигментима најчешће након инкапсулације и преласка у чврсто стање (праха) имају добре физичко-хемијске и функционалне карактеристике и могу се користити као природни адитиви за боје и као додаци за креирање функционалне хране (Pitalua et al., 2010; Janiszewska-Turak, 2014; Tumbas Šaponjac et al., 2016). Главне предности и разлози примене

инкапсулације у прехранбеној индустрији укључују (Shahidi & Han, 1993; Zuidam & Shimoni, 2010; Sonawane et al., 2020; Arenas-Jal et al., 2020):

- Олакшано и прецизније руковање активном компонентом (редукција стварања грудвица, смањена лепљивост, претварање активне компоненте из течног стања у форму праха, итд.);
- Маскирање/прикривање нежељених укуса и мириса активне компоненте;
- Имобилизација активне компоненте у системима за прераду хране;
- Заштита активне компоненте од спољног окружења;
- Редукција испаравања активне компоненте у спољну средину;
- Контролисано отпуштање инкапсулиране активне компоненте;
- Повећање стабилности активне компоненте и продужење њеног рока трајања и
- Подешавање својстава инкапсулиране активне компоненте.

Осетљива биоактивна једињења која се могу инкапсулисати укључују полифенолна једињења, витамине, минерале, пигменте, испарљива једињења, антимикробна једињења, итд. Разматрајући примену у прехранбеној индустрији, предност инкапсулације представља и развој функционалних производа, побољшање органолептичких карактеристика, развој производа са смањеним садржајем масти и конзервисање хране (Calderón-Oliver & Ponce-Alquicira, 2022). Синтетички конзерванси имају негативан ефекат на људско здравље и зато се све више тежи њиховој замени природним конзервансима, који имају исти учинак као синтетички адитиви, али без негативних ефеката на здравље људи, па их стога и потрошачи више преферирају (Sonawane et al., 2020). Есенцијална уља су идеални кандидати за природне конзервансе у прехранбеној индустрији зато што имају антимикробна и антиоксидативна својства и нису токсични, а посредством инкапсулације бивају заштићени од деградације током технолошког процеса и складиштења. Додатно, инкапсулирана биоактивна једињења са антимикробним деловањем могу се користити и за развој активне амбалаже (Zanetti et al., 2018). Поред есенцијалних уља, биљни екстракти су други кандидати за природне конзервансе у циљу очувања безбедности и квалитета прехранбених производа без утицаја на људско здравље (Amjadi et al., 2025). Поставља се питање зашто је имплементација биљних екстраката и есенцијалних уља као замена синтетичким адитивима лимитирана без процеса инкапсулације? Одговор лежи у чињеници да су биљни екстракти, тј. биоактивне компоненте у њима, нестабилне током технолошких процеса и утицаја спољне средине, затим због ниске растворљивости (нарочито важи за есенцијална уља) и на крају њиховог утицаја на укус производа (Amjadi et al., 2025). Стога, након процеса инкапсулације долази до превазилажења ових ограничења (Augustin & Sanguansri, 2012). Поред улоге конзерванса, инкапсулати могу да унапреде квалитет хране и обогате прехранбене производе биоактивним компонентама. Биоактивне компоненте морају бити подвргнуте процесу инкапсулације пре додавања у пића како би биле заштићени од различитих хемијских деградација, неадекватних услова током прераде, складиштења, транспорта и дигестије (Aslam et al., 2021). Поред наведених прехранбених производа, постоје и други производи у које се могу имплементирати инкапсулати, као што су: месо и производи од меса, млеко и производи од млека, воће, поврће, кондиторски производи итд. (Calderón-Oliver & Ponce-Alquicira, 2022). Развојем концепта циркуларне економије дошло је до експанзије процеса инкапсулације, где се кроз валоризацију биоактивних компонената из нуспроизвода прехранбене индустрије применом инкапсулације утиче на заштиту биоактивних компоненти и њихову даљу примену (Alu'datt et al., 2022).

2.2.2. Технике инкапсулације

У циљу добијања високо квалитетних инкапсулата са добро очуваним биоактивним компонентама примењује се велики број техника инкапсулације, а њихов избор зависи од економичности, жељене величине честица инкапсулата, осетљивости активне компонентне и

физичко-хемијских карактеристика тј. природе саме активне компоненте и носача (Shahidi & Nan, 1993). У случају кад се процес инкапсулације користи за добијање различитих прехранбених адитива, параметри као што су безбедност, цена технике и носача се такође морају размотрити (Comunian & Favaro-Trindade, 2016). Непосредно пред саму примену инкапсулационе технике неопходно је екстраховати биоактивну компоненту из (биљног) извора, неком од бројних метода екстракције (Sonawane et al., 2020).

Како природа биоактивних компонената условљава и избор технике инкапсулације, јасно је да не постоји инкапсулациона техника применљива за све типове узорака. Генерално, технике инкапсулације могу се разврстати у три најзначајније и главне категорије: хемијске, физичко–хемијске и физичко–механичке технике инкапсулације (Alu'datt et al., 2022). Најзаступљеније су физичко–механичке технике инкапсулације, које се заснивају на физичким променама у смеши активна компонента–носач, при чему се користе технике попут сушења, замрзавања, гелирања и слично, у циљу формирања честица инкапсулата (Arenas-Jal et al., 2020). У ове технике инкапсулације спадају: спреј сушење, спреј хлађење, лиофилизација, облагање активне компоненте заштитним слојем, процеси засновани на екструзији и емулзији, итд., (Lević, 2014; Arenas-Jal et al., 2020). За разлику од физичких–механичких техника инкапсулације, код хемијских техника инкапсулације дешавају се хемијске промене као што су коацервација, полимеризација, испаравање растварача, наноинкапсулација и формирање липозома (Arenas-Jal et al., 2020). Трећа категорија техника за инкапсулацију јесу технике које се базирају на комбинацији физичко–хемијских промена. Неки од примера физичко–хемијских техника за инкапсулацију јесу комплексна коацервација, липозоми, мицеле, емулзије, молекулско укључивање, испаравање растварача, процеси са наноструктурираним липидним матрицама итд. (Comunian & Favaro-Trindade, 2016).

Неке од најпознатијих и највише примењиваних техника инкапсулације ће бити описане у наставку, при чему је нарочита пажња усмерена на технику спреј сушења која је коришћена за добијање инкапсулата у експерименталном делу ове докторске дисертације.

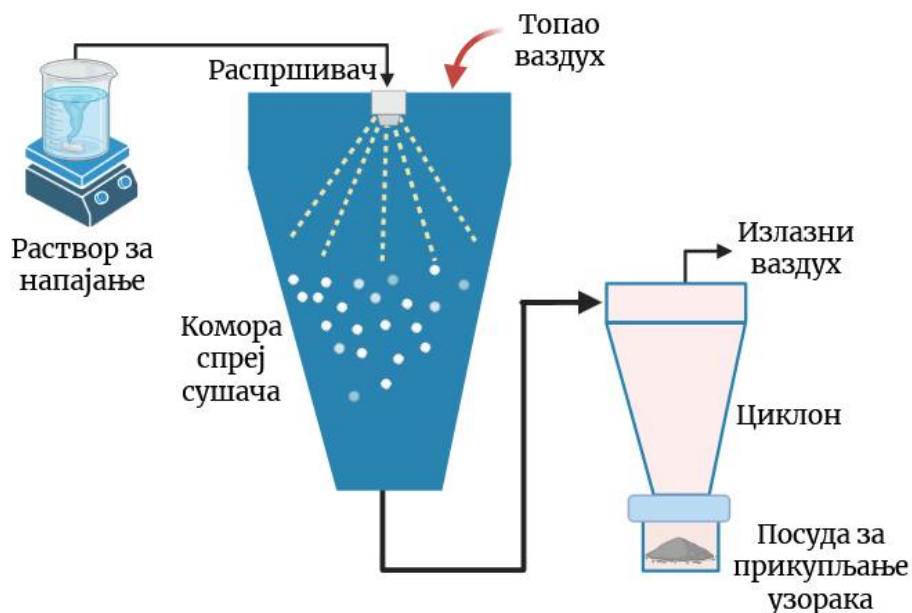
2.2.2.1. Спреј сушење

Спреј сушење се сматра једном од најстаријих техника инкапсулације која се уједно и највише користи у прехранбеној индустрији (Zuidam & Shimoni, 2010; Arenas-Jal et al., 2020). Техника спреј сушења има широку употребу у индустрији из разлога што омогућава ефикасну инкапсулацију одређених биоактивних компонената (Piñón-Balderrama et al., 2020). Велика предност ове технике инкапсулације је несумњиво њена економичност; у поређењу са лиофилизацијом, трошкови производње инкапсулата могу бити мањи и до 30–50 пута (Gharsallaoui et al., 2007). Поред тога, ова техника је веома ефикасна будући да се заснива на веома кратком периоду контакта струје топлог ваздуха и напојне смеше, што за крајњи производ даје инкапсулате у форми сувог, стабилног праха (Comunian & Favaro-Trindade, 2016). Остале предности спреј сушења укључују флексибилност, могућност коришћења великог броја носача за инкапсулацију и доступност опреме. Са друге стране, као главни недостатак се провлачи примена високе температуре и последично оштећење термоосетљивих компоненти (Alu'datt et al., 2022). Ипак, инкапсулација спреј сушењем се користи и код термолабилних компонената попут пигмената беталаина код цвекле, који су подложни брзој деградацији током времена (Bazaria & Kumar, 2018). Поред пигмената, велики број биоактивних компонената може бити инкапсулиран спреј сушењем, као што су: антиоксиданси, витамини, минерали, заслађивачи, боје, уља, ароме, ензими, пробиотици, пептиди, полифеноли и конзерванси (Muzaffar et al., 2016; Bazaria & Kumar, 2018; Piñón-Balderrama et al., 2020; Machado et al., 2022). Стога, примена спреј сушења у процесу инкапсулације је веома распрострањена у прехранбеној индустрији за производњу

различитих адитива са посебним освртом на добијање функционалних адитива са потенцијалним биолошким дејством на људски организам.

Ова физичко-механичка техника инкапсулације се заснива на брзом сушењу течне смеше и њеном претварању у суви прах у струји топлог ваздуха (de Boer et al., 2019). Техника спреј сушења обухвата неколико фаза (Lević, 2014; de Boer et al., 2019; Swami et al., 2020): (1) припрема смеше, односно раствора за напајање (дисперзије или емулзије); (2) хомогенизација дисперзије (раствора за напајање) и (3) спреј сушење хомогенизоване дисперзије у спреј сушачу. Након процеса спреј сушења добијају се стабилне честице инкапсулата у чврстом облику у форми праха са којима је лакше манипулисати у односу на полазну течност.

На Слици 2.15 приказан је принцип спреј сушења. Спреј сушења се заснива на томе да се раствор који је припремљен за сушење распршује у комори за сушење где циркулише заједно са врелим ваздухом, чиме долази до испаравања растварача и где се честице након сушења сакупљају циклоном у посуду одвојену од коморе за сушење (Rezvankeh et al., 2019).



Слика 2.15. Шематски приказ процеса спреј сушења (направљено у програму Biorender)

У процесу инкапсулације спреј сушењем као растварач се најчешће користи вода, али се могу користити и неки органски растварачи, мада се њихова употреба ограничена из безбедносних разлога. Са друге стране, различити носачи се могу користити у процесу инкапсулације спреј сушењем, укључујући различите макромолекуле, као што су: полисахариди, протеини и липиди (Ray et al., 2016). Најчешће коришћени носачи за инкапсулацију спреј сушењем су: малтодекстрин, гума арабика, серум протеини, сојини протеини, итд. (Comunian & Favaro-Trindade, 2016).

На квалитет добијених инкапсулата спреј сушењем утичу услови рада спреј сушача, укључујући улазну и излазну температуру, проток течности (раствора, суспензије или емулзије), као и брзина распршивања и притисак (de Boer et al., 2019). Ако је улазна температура превише ниска, може доћи до непотпуног испаравања воде што последично утиче на принос инкапсулата и добијање инкапсулата са високим садржајем влаге и неуједначеном величином и морфологијом. Са друге стране, превисоке улазне температуре

утичу на пуцања честица инкапсулата и деградације биоактивних компоненти (Ray et al., 2016; Piñón-Balderrama et al., 2020). Неадекватни оперативни услови спреј сушења могу да доведу до ниског приноса и ниске ефикасности инкапсулације (Piñón-Balderrama et al., 2020). Када је реч о величини честица инкапсулата добијених техником спреј сушења, њихова величина се креће у опсегу од 0,1 μm до 100 μm (de Boer et al., 2019). Важно је напоменути да поред оперативних услова спреј сушења на величину и облик честица могу утицати и други фактори, који укључују својства смеше која ће бити подвргнута спреј сушењу, време сушења и проток (Lević, 2014).

Када је реч о ефикасности инкапсулације, она је у највећој мери одређена са два параметра – улазном температуром ваздуха и односом носач/активна компонента, при чему већи удео активне компоненте насупрот уделу носача резултира мањом ефикасношћу инкапсулације (Ђорђевић et al., 2014). Singh & Nathan (2014) оптимизовали су процес спреј сушења сока од цвекле мењајући брзину протока, температуру сушења и концентрацију носача (малтодекстрина), и то на основу њиховог утицаја на физичко-хемијске карактеристике и концентрацију биоактивних компонената. Уочено је да се са порастом температуре сушења и брзине протока смањује концентрација беталаина, док се са порастом удела малтодекстрина њихова концентрација у инкапсулатима повећава. Ови резултати потврђују да процесни параметри спреј сушења имају велики утицај на степен очувања биоактивних компоненти, што је потврђено и у другим истраживањима (Muzaffar et al., 2016; Bazarria & Kumar, 2018).

2.2.2.2. Спреј хлађење

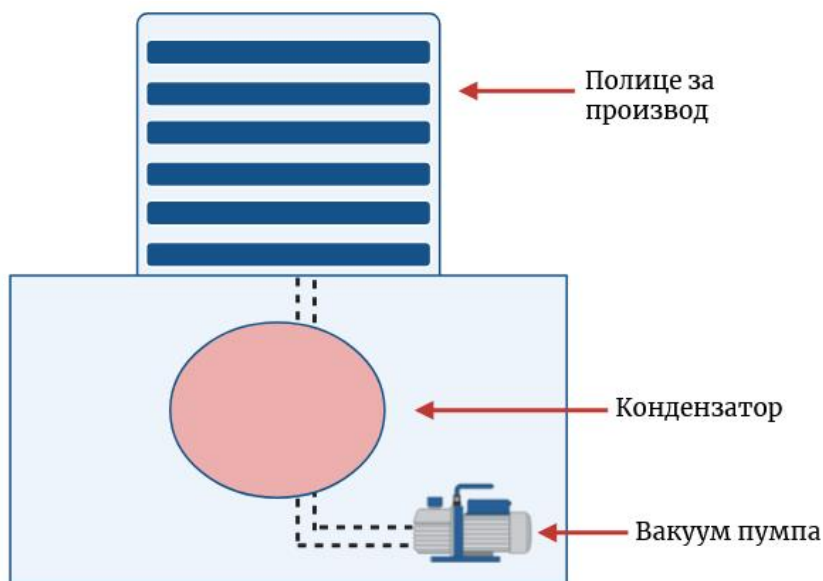
Ова техника инкапсулације се одвија у сличном уређају као и спреј сушење са деловима који подразумевају уређај за хлађење ваздуха (за разлику од спреј сушача који садржи грејач ваздуха), атомизер, комору у којој се формирају честице и колектор (Alu'datt et al., 2022). С тим у вези, једина разлика између ове две технике инкапсулације је у томе што се за спреј сушење у комору уводи загрејан ваздух и честице настају исправањем растварача, док у случају спреј хлађења у комору се уводи хладан ваздух и честице настају очвршћавањем растварача (Shahidi & Han, 1993; Lević, 2014; Alu'datt et al., 2022). Као носачи за ову технику инкапсулације се у највећем броју случајева користе биљна уља или хидрогенизована биљна уља (Timilsena et al., 2020).

Велике предности ове технике инкапсулације јесу ниска цена, једноставност за коришћење и високи производни капацитети (Oxley, 2012). Такође, примена ове технике инкапсулације је популарна за инкапсулацију и стабилизацију термо-осетљивих биоактивних једињења у липидне носаче, као што су витамини, ензими, ароме итд., (Chalella Mazzocato et al., 2019; Timilsena et al., 2020). Ипак, ова техника није толико популарна и коришћена у прехрамбеној индустрији у поређењу са спреј сушењем из практичних разлога, који се огледају у чињеници да се добијају инкапсулати нерастворљиви у води (Timilsena et al., 2020).

2.2.2.3. Лиофилизација

Поред спреј сушења, најзаступљенија техника инкапсулације је несумњиво лиофилизација, која представља процес сушења под вакуумом и на ниским температурама у циљу добијања стабилних инкапсулата у форми праха (Marcillo-Parra et al., 2021). Ова техника инкапсулације представља идеалан избор када су у питању биоактивне компоненте осетљиве на високе температуре, где се процесом сушења на ниским температурама и под вакуумом дешава феномен сублимације у којем се вода уклања директним преласком из чврсте у гасовиту фазу (Kalušević, 2017). Ова техника инкапсулације се одвија у 4 фазе: (1) фаза замрзавања, где се активна компонента и носач замрзавају на веома ниским температурама, најчешће од -90 до -40°C; (2) фаза сублимације која обухвата прелазак воде

(растварача) из чврсте фазе директно у гасну; (3) фаза десорпције уклањања заостале воде и (4) обрада и складиштење добијених инкапсулата (у зависности од примене, добијени инкапсулати могу бити подвргнути процесу млевења) (Zuidam and Shimon, 2010; Lević, 2014; Ray et al., 2016). На Слици 2.16 је приказана шема уређаја за лиофилизацију.



Слика 2.16. Шематски приказ лиофилизатора (направљено у програму Biorender)

Предност коришћења ове технике инкапсулације је та да се може инкапсулисати велики број биоактивних компоненти, са посебним освртом на инкапсулацију пробиотских бактерија (Kandasamy & Naveen, 2022). Иако се процесом лиофилизације добијају производи високог квалитета, мана ове технике се огледа кроз високу хигроскопност добијених прахова (Arenas-Jal et al., 2020). Међутим, несумњиво највећи недостатак ове технике инкапсулације је њена неекономичност, односно веома висока цена и утрошак велике количине енергије, што је последица дугог периода целокупног поступка који траје више од 20 h (Shahidi & Han, 1993; Lević, 2014; Ray et al., 2016).

2.2.2.4. Облагање у флуидизованом слоју

Секундарно премазивање/облагање већ инкапсулираних производа у циљу повећања њихове стабилности се може извршити техником облагања у флуидизованом слоју (Alu'datt et al., 2022). Наиме, активна компонента се већ налази у чврстом стању (у форми праха), док се у циљу додатне заштите на њу наноси додатни слој заштитног омотача (премаза), и то континуирано или у серијама распршивањем носача по активној компоненти која се налази у флуидизованом стању (Lević, 2014, Ray et al., 2016). За квалитет инкапсулата су веома важни процесни параметри као што су брзина циркулације чврсте материје, брзина облагања, притисак атомизације и температура (Ray et al., 2016). Вреди поменути да се као носачи којима се облаже активна компонента углавном користе деривати целулозе, протеина, скроба, декстрини и гуме (Zuidam and Shimon, 2010). Недостацима ове технике се огледају у цени и неуједначеним и неправилним секундарним премазом на инкапсулатима (Alu'datt et al., 2022).

2.2.2.5. Коацервација

Коацервација је техника инкапсулације која је нашла примену у различитим индустријама као што су прехранбена, фармацеутска и текстилна индустрија. У области прехранбене индустрије се користи за инкапсулацију арома и једињења која су осетљива на температуру (Timilsena et al., 2019). Сам појам коацервација представља термин којим се описује раздвајање фаза које може бити узроковано променама јонске јачине, температуре

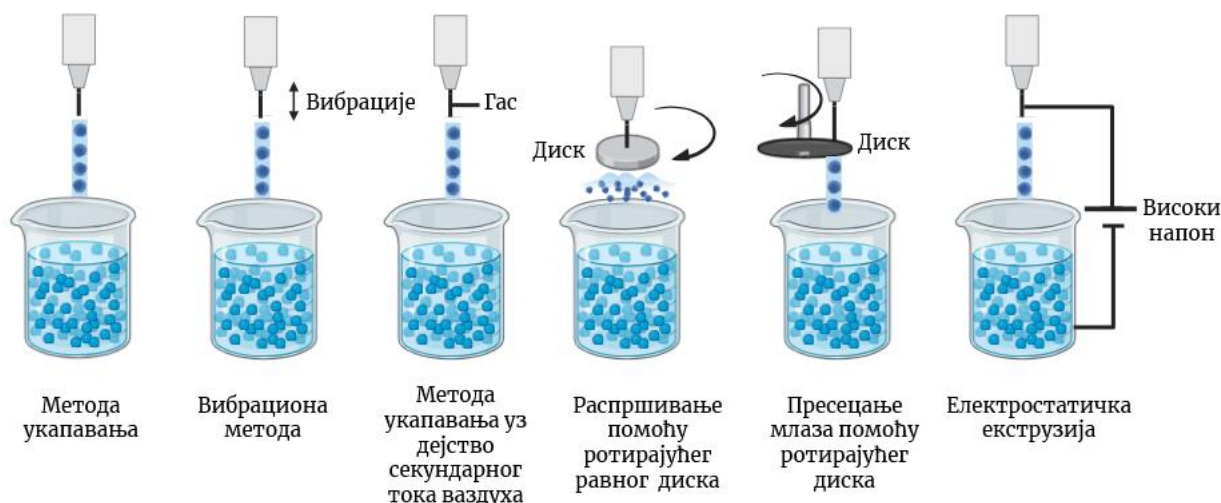
или рН вредности у суспензији (Alu'datt et al., 2022). У систему где је активна компонента распоређена у одређеним носачима тј. њиховим растворима, варирањем одређених параметара система долази до раздвајања фаза и формирања филма носача око активне компоненте (Lević, 2014). Цео процес се одвија у 4 фазе: (1) мешање; (2) емулговање; (3) коацервација и (4) очвршћавање (Alu'datt et al., 2022).

У зависности од броја коришћених носача–полимера, коацервација може бити проста (један полимер) или сложена (два или више полимера који ступају у електростатичке интеракције) (Comunian & Favaro-Trindade, 2016). У пракси су најзаступљенији биополимери као што су арапска гума и желатин због ниске цене и супротних наелектрисања, па се зато и најчешће користе за производњу комплексних коацервата (Lević, 2014; Comunian & Favaro-Trindade, 2016). Недостаци примене ове методе јесу цена, сложеност поступка и примена средстава за очвршћавање која су потенцијално опасна (Kalušević, 2017; Alu'datt et al., 2022). Поред тога, недостатак се огледа и у ниској стабилности сложених коацервата који су стабилни у уском опсегу јонске јачине и рН вредности, као и мали број полимера који се могу користити за ову технику инкапсулације (Timilsena et al., 2020).

2.2.2.6. Екструзионе технике инкапсулације

Екструзионе технике инкапсулације представљају технике засноване на процесу екструзије – потискивања смеше активне компоненте и носача кроз отворе различитих облика и димензија у циљу инкапсулирања активне компоненте. Ове технике постају популарне у прехранбеној технологији и то у процесу инкапсулације биоактивних компонената у полимерним честицама, а огледају се у једноставности извођења и високе ефикасности инкапсулације (Lević, 2014; Alu'datt et al., 2022). Главне предности примене ових метода су одсуство високих температура и растварача, док се са друге стране недостаци огледају у спорој производњи што отежава њену примену на индустријском нивоу (Fangmeier et al., 2019). Све што је неопходно од опреме је дизна (игла) кроз чији отвор пролази смеша активне компоненте и носача, и прихватни суд у којем под различитим условима долази до очвршћавања новонасталих капљица у капсуле под утицајем физичких (промена температуре) или хемијских реакција (гелирање), у зависности од природе носача који је коришћен у процесу инкапсулације (Ђорђевић et al., 2014; Huang et al., 2023). Извођење техника екструзије је прилично једноставно и одвија се у 4 фазе: (1) припрема смеше активне компоненте и носача; (2) процес екструзије (укапавања); (3) очвршћавање новонасталих капсула и (4) одвајање новонасталих капсула из раствора (Lević, 2014).

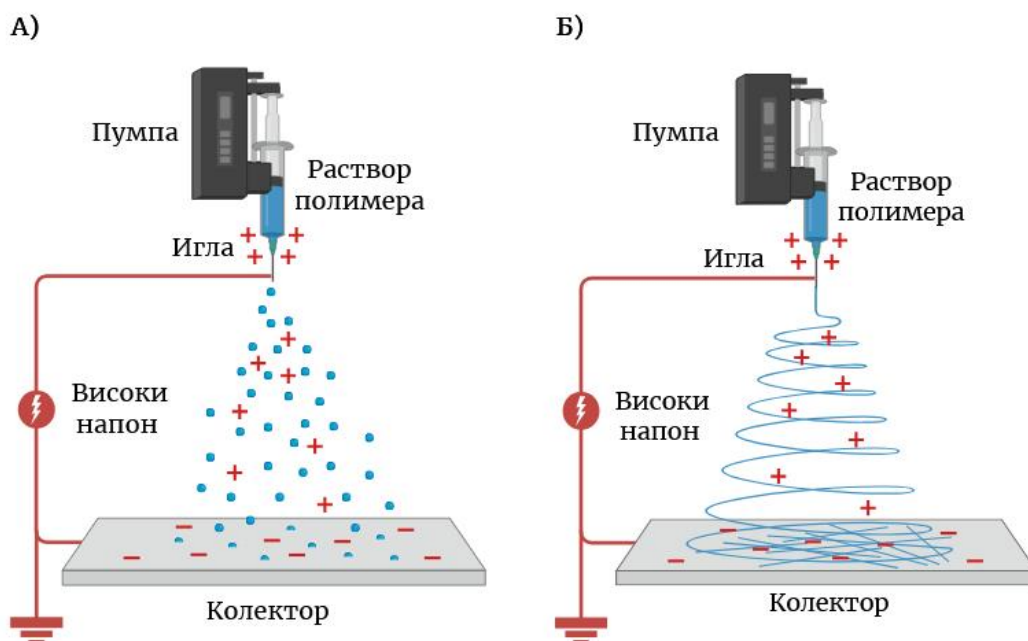
Како су горе наведени кораци неопходни за одвијање процеса добијања честица путем екструзије, свака од техника има своју специфичност. Класификација екструзионих техника инкапсулације се заснива на њиховом различитом механизму формирања капљица (честица), које могу настати као резултат дејства површинског напона, гравитационе силе, импулса или силе трења (Ђорђевић et al., 2014). Стога се екструзионе технике инкапсулације могу поделити на: техника укапавања, вибрациона техника, техника укапавања уз дејство секундарног тока ваздуха, техника распршивања помоћу ротирајућег равнoг диска, техника пресецања млаза помоћу ротирајућег диска и електростатичка екструзија (Lević, 2014) (Слика 2.17). Како је већ напоменуто, подела ових техника је извршена на основу механизма формирања честица, стога је важно напоменути да се код првих пет екструзионих техника формирање честица врши на следећи начин: техника укапавања – честице се формирају само на основу гравитационе силе; вибрациона техника – вибрација утиче на формирање честица; техника укапавања – уз дејство секундарног тока ваздуха, ваздух који се уводи у нивоу отвора игле утиче на формирање честица; техника распршивања – распршивање се врши применом ротирајућег диска који великом брзином утиче на формирање честица малих димензија; техника пресецања млаза – ротирајући диск пресеца млаз течности и тако формира честице.



Слика 2.17. Шематски приказ техника заснованих на процесу екструзије (направљено у програму Biorender)

У последње време велику популарност за производњу инкапсулата су добиле електростатичке технике инкапсулације у циљу добијања униформних честица (капсула) малих димензија (Lević, 2014; Đorđević et al., 2014). Принцип извођења ове технике се базира на примени електричног поља на ток течности, при чему електростатичко поље надвлађава површински напон чиме долази до формирања капљица, које услед гравитационе силе падају у раствор за гелирање и формирају капсуле (Lević, 2014). Наиме, електростатичке силе су заслужне за формирање честица при чему је неопходно да је врх игле повезан за електростатички генератор, услед чега се јављају издужене капљице у облику ткз. Тејлоровог конуса које падају у раствор за гелирање (Lević, 2014; Kalušević, 2017; Costa et al., 2022). Добијене мале честице могу да буду различитих величина, а фактори који утичу на пречник честица су електростатички потенцијал, пречник игле, растојање електрода, брзина протока раствора полимера, вискозитет раствора, густина раствора и његов површински напон (de Boer et al., 2019; Costa et al., 2022). С тим у вези, примена електростатичке екструзије је позната у домену инкапсулације различитих ћелија микроорганизама и ензима (Burgain et al., 2011; Kalušević, 2017). Када и овај фактор узмемо у разматрање, онда ћелије унутар раствора полимера, такође могу утицати на величину честица и динамику процеса електростатичке екструзије услед деловања физичких интеракција ћелија и полимера (Costa et al., 2022). Друга битна ствар у процесу електростатичке екструзије је избор носача за процес инкапсулације где је најчешће коришћени носач алгинат (Dobroslavić et al., 2024).

Посебну пажњу треба усмерити и на две сличне екструзионе технике инкапсулације, **електропредење** (енгл. *electrospinning*) и **електропрскање** (енгл. *electrospraying*), чији је шематски приказ дат на **Слици 2.18**. Ове технике представљају електро-хидродинамичке процесе у којима раствор биополимера и активне компоненте бива распршен или спинован под утицајем високонапонског електричног поља у циљу добијања честица или влакана (Đorđević et al., 2014; de Boer et al., 2019). Главна разлика између ових двеју техника се огледа у различитој концентрацији полимера који се користи за инкапсулацију. Уколико се користи полимер високе концентрације долази до формирања влакана (електропредење), док се при ниској концентрацији полимера формирају честице (електропрскање) (de Boer et al., 2019). Приликом екструзије истовремено се одвија и испирање растварача што доводи до очвршћавања капљица и влакана које даље падају на уземљени колектор (Anu Bhushani & Anandharamakrishnan, 2014). Апаратура за извођење ових техника може да буде постављена вертикално или хоризонтално, а њени главни делови представљају извор високог напона, игла или капилара од нерђајућег челика, пумпа за шприц и уземљени колектор (Drosou et al., 2017) (**Слика 2.19**).



Слика 2.18. Електропрскање (А) и електропоређење (Б) (направљено у програму Biorender)

Код ових техника се као носачи најчешће користе протеини, као што су изолати и концентрати протеина сурутке, изолати протеина соје, колеган, зеин, желатин, казеин и беланчевине јаја (Bamidele & Emmambux, 2021; Castro Coelho et al., 2021). Фактори који утичу на морфологију и пречник честица и влакана потичу од особина раствора (поларитет, врста растварача, концентрација раствора, вискозитет, површински напон, молекулска маса полимера и проводљивост), затим процесни параметри (примењени напон, растојање између врха игле и колектора, пречник игле, брзина протока) и фактори околине (влажност, температура и проток ваздуха) (Castro Coelho et al., 2021). Честице добијене електропрскањем су најчешће правилног сферног облика (Castro Coelho et al., 2021).

Применом ових техника у прехранбеној индустрији омогућена је инкапсулација биоактивних једињења, имобилизација ензима, развој активне амбалаже за храну и материјала за филтрацију, при чему се ове технике примењују и у фармацеутске и биомедицинске сврхе (Anu Bhushani & Anandharamakrishnan, 2014; Drosou et al., 2017; Castro Coelho et al., 2021). Ове технике одликује једноставност извођења и флексибилност за производњу влакана и честица, а велика предност је и одсуство високих температура, што даље резултује високом ефикасношћу инкапсулације (Castro Coelho et al., 2021).

2.2.2.7. Емулзификација

Појам емулзије означава смешу две немешљиве течности, обично мешавина уља и воде, где једна од течности садржи капљице друге течности (Lu et al., 2016). Разликују се два основна типа емулзија, први је већ поменута емулзија уља у води где су капљице уља расуте у воденој фази (млеко, супе), док емулзија воде у уљу представља систем где су капљице воде расуте у уљаној фази (путер) (Lu et al., 2016; Salevic et al., 2018). Ова техника инкапсулације се најчешће користи за инкапсулацију липосолубилних витамина, пробиотских бактерија и арома (Zuidam & Shimoni, 2010; Burgain et al., 2011; Lević, 2014). Велики број инкапсулационих техника се ослања на стварање емулзије као део процеса инкапсулације, укључујући и спреј сушење (Arenas-Jal et al., 2020). Принцип инкапсулације емулзионим техникама се базира на дисперзији течне активне компоненте у раствор који садржи растворени носач, који затим формира омотач око активне компоненте (Arenas-Jal et al., 2020). Уређаји који се користе за емулзификацију су различити типови хомогенизатора (Lu et al., 2016). Техника емулзификације спада у једне од најчешће коришћених метода за

производњу микрочестица у фармацеутској индустрији услед једноставности процеса, лаке контроле производних параметара и ниске цене и приступачности опреме (Burgain et al., 2011; Tan & Danquah, 2012). Главни недостатак ове технике је несумњиво добијање честица са варијабилном величином и морфологијом (Burgain et al., 2011).

2.2.2.8. Липозоми

Липозоми представљају затворене везикуларне структуре у чијој структури су присутна два слоја хидратисаних фосфолипида (de Boer et al., 2019). У домену инкапсулације, липозоми представљају структуре реда величина од неколико нанометара до неколико микрона где активна компонента бива смештена унутар фосфолипидних мембрана. Главне технике за добијање липозома представљају оне које користе колоидне млинове и поступак микрофлуидизације, а сам механизам њиховог настанка се заснива на интеракцији између фосфолипида и молекула воде, где се активна компонента може налазити у воденој фази или је везана за липозомалну мембрану (da Silva Malheiros et al., 2010; Lević, 2014).

Липозоми се најчешће користе у фармацеутској индустрији док је њихова употреба у прехранбеној индустрији ограничена; једна од забележених примена јесте у циљу побољшања сазревања тврдих сирева (Zuidam & Shimon, 2010). Са друге стране, примена липозома у прехранбеној индустрији има потенцијал будући да се могу припремити од природних нетоксичних компонената (Ђорђевић et al., 2014). Велика предност примене липозома представља и могућност инкапсулације и хидрофобних и хидрофилних молекула, а нарочито етеричних уља, каротеноида и хидрофобних пептида (de Boer et al., 2019).

2.2.3. Материјали за инкапсулацију

Главна сврха носача, односно материјала за инкапсулацију, је формирање заштитног слоја између активне компоненте и спољашње средине (Kalušević, 2017). Ови материјали могу бити различитог порекла и карактеристика, а да би се могли користити у процесима инкапсулације у прехранбеној индустрији морају да испуне одређене захтеве. Главни услов је да носач буде прехранбеног квалитета и безбедан за употребу, затим да буде биоразградив и стабилан током технолошког процеса обраде хране, њеног складиштења и потрошње (de Boer et al., 2019). Поред тога, један од водећих изазова у домену избора носача за инкапсулацију поред безбедности и квалитета носача, јесте несумњиво и њихова висока цена, која представља додатно ограничење за примену многих инкапсулационих техника (Wandrey et al., 2010).

Избор носача активне компоненте у великој мери зависи од врсте активне компоненте, као и од процеса и производа у којем ће се применити добијени инкапсулати (Lević, 2014). Нарочито је популарно коришћење мешавине носача у циљу боље заштите активне компоненте и добијања финалног инкапсулата са dobrим карактеристикама, где у том случају један носач има боље карактеристике и пружа добра механичка својства, док други пружа заштиту од нпр. кисеоника (Lević, 2014).

Постоји велики број носача који се могу користити у процесима инкапсулације, при чему су то најчешће биомолекули као што су полисахариди, протеини и липиди (Wandrey et al., 2010; Lević, 2014; Timilsena et al., 2020;):

1. Полисахариди (скроб и његови деривати, целулоза и њени деривати, биљни екстракти, биљни екстракти, алгинат, караген, хитозан, ксантан, гелан, декстран, малтодекстрин и инулин);
2. Протеини (глутен, протеински изолати соје и грашка, зеин, желатин и протеини сурутке);
3. Липиди (масне киселине, алкохоли, воскови, фосфолипиди и глицериди) и

4. Остали материјали: парафин, поливинилалкохол, поливинилпиролidon, оксиди алуминијума и силицијума.

Правилан избор носача за инкапсулацију је од пресудне важности за постизање високе ефикасности инкапсулације и стабилности инкапсулата, као и успешности самог процеса инкапсулације (Ray et al., 2016). Кључни услови које сваки носач треба да испуни: (1) хемијски не реагује са активном компонентом, (2) да има способност задржавања активне компоненте унутар своје структуре, (3) способност заштите активне компоненте од спољног окружења, (4) способност елиминације растварача током процеса инкапсулације, (5) способност дисперговања или емулговања активне компоненте, (6) лако руковање итд. (Ray et al., 2016; Marković, 2025).

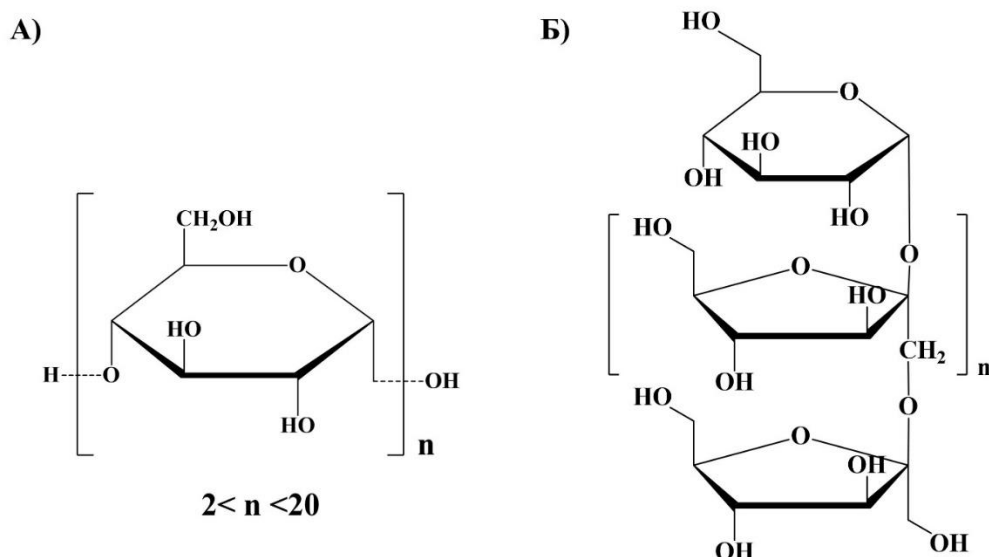
Биљни и анимални протеини се веома често користе као материјали за носаче у процесу инкапсулације. Предност коришћења протеина као носача у процесу инкапсулације представљају њихова добра физичко-хемијска и функционална својства (способност емулговања, формирање гела и способност стварања филма) (Timilsena et al., 2020). Са друге стране, главно ограничење њихове примене у процесу инкапсулације представља чињеница да су многи од њих алергени (Timilsena et al., 2020). Остали недостаци укључују високу цену, слабу растворљивост у хладној води и ниску ефикасност инкапсулације, због чега се веома често примењује мешање ових носача са угљенохидратним материјалима (Labuschagne, 2018).

Липиди представљају хидрофобне материјале па се веома често користе за инкапсулацију хидрофилних једињења (Timilsena et al., 2020). Најчешће коришћени липиди за инкапсулацију су воскови, фосфолипиди и глицериди (Kandasamy & Naveen, 2022).

Посебно важна група материјала за инкапсулацију су угљени хидрати, пре свега полисахариди који представљају хидроколоиде са добром способношћу желирања и који могу да инкапсулирају различите молекуле (Santiago & Castro, 2016). Полисахариди су коришћени као носачи за инкапсулацију витамина, липида и етеричних уља, полифенолних једињења, арома, пигмената, лекова, хербицида, пробиотика и других микроорганизама (Hoyos-Leyva et al., 2018). Главни разлог њихове широке употребе у процесу инкапсулације лежи у њиховој распрострањености у природи, која утиче на њихову ниску цену (Labuschagne, 2018). У овој докторској дисертацији су као носачи коришћени добро познати полисахариди малтодекстрин и инулин.

2.2.3.1. Малтодекстрин

Малтодекстрини су угљени хидрати који припадају групи олигосахарида састављених од јединица D-глукозе повезаних α -(1,4) гликозидним везама, а добијају се делимичном киселинском или ензимском хидролизом скроба (Слика 2.19А). Степен хидролизе малтодекстрина дефинише се преко декстрозних еквивалената (ДЕ), односно процентуалног удела молекула глукозе, а у случају малтодекстрина ДЕ се креће у распону од 0 до 20 (Labuschagne, 2018; Zhao et al., 2023). ДЕ вредност директно утиче на физичкохемијске карактеристике малтодекстрина, па тако малтодекстрини са вишим вредностима ДЕ одликује већа растворљивост, али и хигроскопност (Todorović et al., 2022). На Слици 2.19А је приказана хемијска структура малтодекстрина.



Слика 2.19. Хемијска структура (А) малтодекстрина и (Б) инулина

Малтодекстрини су најчешће коришћени носачи за инкапсулацију, пре свега захваљујући ниској цени, ниском вискозитету при високим концентрацијама, ниској пропустљивости за кисеоник, неутралној ароми и укусу, доброј сварљивости и растворљивости у хладној води (Kalušević, 2017; Zhao et al., 2023). За производњу ових беличастих прахова може се користити скроб из различитих извора, укључујући кукуруз, кромпир и пшеницу (Wandrey et al., 2010).

Малтодекстрин се најчешће користи као носач за инкапсулацију полифенолних једињења техником спреј сушења због већ поменутих позитивних карактеристика који се огледају у одличној заштити биоактивних једињења од термалне деградације и оксидације (Ђорђевић et al., 2014; Gaćina, 2024).

2.2.3.2. Инулин

Инулин је полисахарид са степеном полимеризације између 3 и 60, а састоји се од линеарног ланца јединица D-фруктозе повезаних преко β -(2,1) гликозидних веза, са јединицама глукозе на редукционом крају (Saavedra-Leos et al., 2014; Du et al., 2023; Gaćina, 2024) (Слика 2.19Б). Може се изоловати из различитих извора, укључујући различите врсте цикорије, пшенице, овса и белог лука; мање познати извори обухватају морске алге, бактерије и гљиве, при чему функционалност самог полимера зависи од порекла (Labuschagne, 2018; Kamel et al., 2021; Du et al., 2023).

У питању је нетоксичан, високо биоразградив полимер, безбедан за употребу у прехранбеној индустрији, где се и најчешће користи као замена за маст и шећер, као модификатор текстуре и за побољшање органолептичких карактеристика (Afinjuoto et al., 2021). Велику пажњу научне јавности привукао је због свог пребиотичког ефекта који се огледа у позитивним дејствима на гастроинтестинални тракт и имуни систем, будући да позитивно утиче на апсорпцију калцијума и магнезијума, регулише глукозу у крви, смањује гојазност, смањује ниво холестерола у крви и помаже у превенцији кардиоваскуларних болести (Raju & Pal, 2014; Du et al., 2023). С обзиром на свој ниски гликемијски индекс, инулин представља одличну алтернативу за малтодекстрин. Поред позитивних здравствених ефеката, експанзија коришћења инулина као носача у процесу инкапсулације у великој мери је условљена његовом ниском ценом, заједно са добрим функционалним и технолошким својствима (Beirão-da-Costa et al., 2013). Инулин је до сада коришћен као носач у процесима инкапсулације есенцијалних уља, различитих биљних екстраката и сокова коришћењем технике спреј сушења (Saavedra-Leos et al., 2014; Rodsuwan et al., 2024).

Стога, у овој докторској дисертацији су коришћени носачи малтодекстрин и инулин у циљу добијања инкапсулата сокова микробиља са високим садржајем биоактивних једињења, високом антиоксидативном активношћу и добрим физичко–хемијским параметрима.

2.2.4. Инкапсулација клица и микробиља различитих биљних врста

Иако инкапсулација биљних екстраката представља све заступљенији тренд у науци, посебно у развоју потенцијално функционалних адитива, истраживања која су усмерена на инкапсулацију екстраката и сокова добијених из клица и микробиља различитих биљних врста и даље су у зачетку. За сада постоји само неколико студија које су се бавиле инкапсулацијом активних компонената из клица и микробиља (**Табела 1**), коришћењем различитих техника инкапсулације, као што су: јонско гелирање, емулзификација, лиофилизација и спреј сушење у циљу очувања и стабилизације биоактивних једињења.

Табела 1. Инкапсулација клица и микробиља и њихових екстраката различитим техникама инкапсулације

Извор биоактивних компоненти	Носач	Техника инкапсулације	Референца
Кикирики – клица	Триацилглицерол (примарна емулзија) + Малтодекстрин + протеини сурутке + гума арабика (секундарна емулзија)	Емулзификација	Lee et al., 2013
Кикирики – клица	Триацилглицерол (примарна емулзија) + Малтодекстрин/протеини сурутке (секундарна емулзија)	Емулзификација + спреј сушење	Lee et al., 2015
Пшенична трава – клица	Малтодекстрин + протеини сурутке	Леофилизација	Akbas et al., 2017
Броколи – клица	Лецитин + гума из семена босиљка	Нанолипозоми + леофилизација	Azarashkan et al., 2022a
Броколи – клица	Натријум алгинат	Јонско гелирање	Lv et al., 2020
Кељ – клица	Малтодекстрин	Спреј сушење	Ortega-Hernández et al., 2023
Чија – клица	Гума из чија семена/ желатин/ гума из чија семена + желатин	Леофилизација	Abdel-Aty et al., 2024
Црвена мизуна – микробиље	Натријум алгинат	Јонско гелирање	Bafumo et al., 2025
Мунго пасуљ – микробиље	Натријум алгинат	Јонско гелирање	Lekshmi & Nair, 2020

Кикирики је богат извор полифенолних једињења, нарочито ресвератрола који је веома подложен деградацији при неповољним факторима спољне средине (Lee et al., 2015). Како би спречили његову деградацију Lee et al. (2013) су инкапсулирали екстракт клица кикирија техником спреј сушења и носачима на бази протеина сурутке, малтодекстрина и гума арабике. Истаживања на инкапсулатима екстраката од клица кикирикија исти аутори су проширили у правцу истраживања стабилности добијених инкапсулата (Lee et al., 2015). На основу добијених резултата се могло закључити да инкапсулати имају високу стабилност током периода складиштења и да се могу успешно користити као функционални састојци у формулацији прехранбених производа.

Поред екстраката клица, као сировина за процес инкапсулације коришћени су и сокови клица. У студији Akbas et al. (2017) коришћен је сок од пшеничне траве у циљу добијања стабилних инкапсулата за развој функционалне хране. Познате клице биљака из фамилије Brassicaceae су такође коришћене у процесу инкапсулације, укључујући екстракте клице кеља и броколија (Lv et al., 2020; Ortega-Hernández et al., 2023). До сада постоје само две студије које су користиле микробиље црвене мизуне и мунго пасуља за процес инкапсулације техником јонског гелирања (Bafumo et al., 2025; Lekshmi & Nair, 2020). Са друге стране, постоји само један рад у коме су добијени наноинкапсулати додавани у рикота сир у циљу добијања функционалног производа (Azarashkan et al., 2022b).

Када је о техникама инкапсулације реч, спреј сушење се сматра једном од најчешће коришћених техника, пре свега због своје флексибилности, једноставности у раду и ниских оперативних трошкова (Araújo-Díaz et al., 2017). Додатно, предност примене спреј сушења у процесу инкапсулације огледа се у заштити термолабилних биоактивних компонената, као што су фенолна једињења, беталаини, глукозинолати, витамини и минерали, као и у широкој примени у прехрамбеној индустрији за добијање функционалних адитива са потенцијалним биолошким дејством (Bazaria & Kumar, 2018; Piñón-Balderrama et al., 2020).

Узимајући у обзир преглед литературе може се закључити да постоји мали број истраживања која су се бавила инкапсулацијом екстраката и сокова клица и микробиља. При том посебан потенцијал има инкапсулација сокова будући да не захтева примену растварача, што је од великог значаја како за очување нутритивног састава производа, тако и са еколошког аспекта. Студије које су користиле сокове микробиља броколија, цвекле и амаранта за инкапсулацију техником спреј сушења до сада нису публиковане и из тог разлога, посебна вредност ове дисертације огледа се у иновативној примени технике спреј сушења за инкапсулацију хладно цеђених сокова од микробиља, као јединственом приступу заштити ових биоактивних једињења и развоју нових функционалних адитива.

3. ЦИЉЕВИ ИСТРАЖИВАЊА

Циљ ове докторске дисертације је добијање и инкапсулација сока од микробиља одабраних биљних врста (амарант, цвекла и броколи), детаљна карактеризација добијеног сока/инкапсулата, и даља примена инкапсулата у формулацији потенцијално функционалних прехранбених производа. Да би се ово постигло хронолошки је урађено следеће:

- ❖ Производња хладно цеђених сокова од микробиља амаранта, цвекле и броколија са високим садржајем биоактивних компоненти, као и њихова детаљна фитохемијска карактеризација применом течне хроматографије и спектрофотометрије у циљу одређивања укупног садржаја фенолних једињења и флавоноида, укупног садржаја беталаина, укупног садржаја хлорофила, процене антиоксидативне активности и сензорне прихватљивости. Поред тога, анализирани су профили биоактивних једињења свежег микробиља амаранта, цвекле и броколија како би се испратила миграција појединих глукозинолата, фенолних једињења и беталаина из микробиља у сокове, али и како би се објасниле потенцијалне трансформације наведених једињења током процеса производње сокова.
- ❖ Инкапсулација хладно цеђених сокова од микробиља амаранте, цвекле и броколија техником спреј сушења коришћењем малтодекстрина и инулина као носача за биоактивне компоненте. Детаљна хемијска карактеризација добијених инкапсулата извршена је коришћењем течне хроматографије, затим спектрофотометријско одређивање укупног садржаја фенолних једињења и флавоноида, укупног садржаја беталаина и антиоксидативне активности, а поред тога је извршена и физичко–хемијска, морфолошка и структурна карактеризација. Такође је испитан и ефекат коришћених носача на садржај биоактивних једињења и антиоксидативну активност сокова од микробиља, као и на разлику у физичко–хемијским параметрима и боји.
- ❖ Имплементација добијених инкапсулата сокова од микробиља у кисело-млечни производ – јогурт, као и детаљна карактеризација добијених производа у погледу физичко-хемијских и текстуралних параметара, укупног садржаја фенолних једињења, антиоксидативне активности и сензорних својстава.

Укратко, циљ ове дисертације био је развој и производња сокова од микробиља амаранта, цвекле и броколија са високим садржајем биоактивних једињења и снажном антиоксидативном активношћу, а тиме и потенцијалним позитивним ефектима на људско здравље, чиме се истовремено повећава њихова присутност на тржишту иновативних производа. Такође, циљ је био и добијање инкапсулата од сокова микробиља ради њихове потенцијалне употребе као функционалних адитива у прехранбеним производима, као и развој потенцијално функционалних кисело–млечних производа са додатком истих.

4. МАТЕРИЈАЛ И МЕТОДЕ

4.1. Материјал

4.1.1. Микробиље

За потребе истраживања у склопу ове докторске дисертације коришћено је микробиље одабраних биљних врста – броколија, цвекле и амаранта. Узорци наведеног микробиља су великодушно добијени од локалне компаније „Plantica” са производњом и седиштем у Београду. Микробиље је гајено у пластичним посудама испуњеним супстратом, постављеним на полицама у затвореном простору. Услови гајења били су контролисани, укључујући примену вештачког осветљења и одржавање одговарајуће влажности ваздуха (85%) и температуре (20 °C). Берба микробиља је извршена након 12 дана од клијања и то при појави првих правих листова и потпуно развијених котиледона. Фазе производње микробиља од семена до развоја микробиља су шематски приказане на **Слици 4.1**



Слика 4.1. Фазе производње микробиља од семена до формирања котиледона и појаве првих правих листова

4.1.2. Носачи за инкапсулацију

Малтодекстрин (16.0–19.9 DE) и инулин су набављени од Sigma-Aldrich (Дармштат, Немачка) и били су прехранбеног квалитета (енгл. food grade quality), односно безбедни и прикладни за директно додавање у прехранбене производе.

4.1.3. Сировине за производњу јогурта

За производњу јогурта је коришћено пастеризовано, хомогенизовано млеко са 2,8% млечне масти и 3,0% протеина које је набављено у локалном маркету. За ферментацију јогурта коришћене су комерцијалне стартер културе YoFlex 812 (Chr Hansen, Данска).

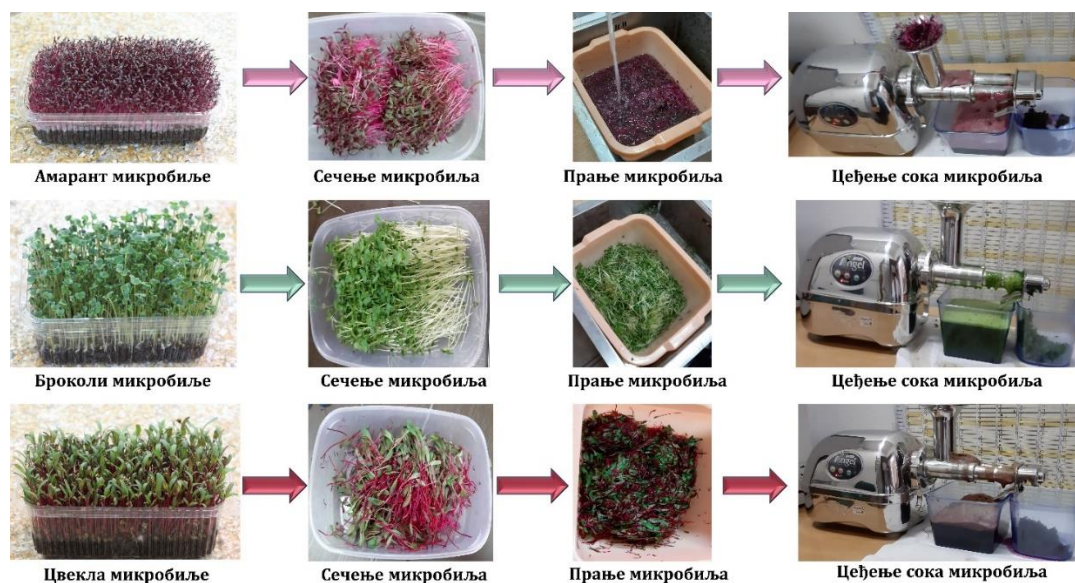
4.1.4. Хемикалије

Folin–Ciocalteu реагенс и анхидровани натријум-карбонат су набављени од Merck (Дармштат, Немачка). Аналитички стандарди гална киселина, кверцетин, гентизинска киселина, кумаринска киселина и апигенин су купљени од Sigma-Aldrich (Дармштат, Немачка). Trolox (6-хидрокси-2,5,7,8-тетраметилхроман-2-карбоксилна киселина) је купљен од Acros Organics (САД). 2,2'-азино-бис(3-етилбензотиазолин-6-сулфонска киселина) (ABTS^{•+}), 2,2-дифенил-1-пикрилхидразил (DPPH[•]), 2,4,6-трис(2-пиридил)-s-триазин (TPPZ), гвожђе-(III)-хлорид-6-хидрат, алуминијум-хлорид, натријум-нитрит, калијум-персулфат, натријум-ацетат и натријум-хидроксид су купљени од Sigma Chemicals Co. (САД). Метанол HPLC степена чистоће купљен је од J.T.Baker (Филипсбург, Њујорк, САД). Глацијална сирћетна киселина, апсолутни етанол и хлороводонична киселина су купљени од ZORKA Pharma (Шабац, Србија). Натријум дихидроген фосфат је купљен од ALKALOID AD (Република Северна Македонија), а динатријум-хидроген фосфат од Nemox (Србија).

4.2. Методе

4.2.1. Производња хладно цеђених сокова од микробиља

Процес производње хладно цеђених сокова обухватао је следеће фазе припреме микробиља: сечење микробиља на неколико центиметара изнад супстрата помоћу дезинфикованих маказа (берба), затим мерење микробиља и прање под млазом текуће воде у циљу уклањања различитих заосталих нечистоћа (супстрата, непроклијаних семена и прашине). Очишћено микробиље које чине стабло, котиледони и прави листови подвргнуто је процесу хладног цеђења применом супер-спорог соковника (Angel Juicer 8500, Angel Co., Ltd., Бусан, Јужна Кореја). Добијени хладно цеђени сокови од микробиља су затим паковани у одговарајуће пластичне кивете. Један део сокова микробиља складиштен је на температури од -20 °C у замрзивачу и чуван до спровођења сензорне анализе, док је други део захтевао додатни корак припреме: центрифугирање на 9000 обр/мин у трајању од 12 минута у центрифуги (Воесо U-320, Хамбург, Немачка) ради уклањања чврстих фракција сокова. Тако припремљени узорци складиштени су на температури од -20 °C, у замрзивачу за даље анализе коришћењем спектрофотометријских и хроматографских техника. Шематски приказ производње хладно цеђених сокова од микробиља броколија, цвекле и амаранта је приказан на Слици 4.2.



Слика 4.2. Шематски приказ процеса производње хладно цеђених сокова од микробиља

4.2.2. Карактеризација сокова од микробиља

4.2.2.1. Хроматографска анализа

4.2.2.1.1. Припрема екстракта микробиља и хладно цеђених сокова од микробиља

Исечени надземни делови микробиља су фино спрашени коришћењем течног азота. Самлевени прашови селектованог микробиља су екстраховани раствором 80%-ог метанола који садржи 0,1% HCl (1:10 w/v) уз мешање на механичкој мешалици (Thys 2, MLW Labortechnik GmbH, Зелбах, Немачка) у трајању од једног сата (Kolarević et al., 2021). По завршетку мешања, узорци су центрифугирани на 4000 обр/мин у трајању од 10 минута. Издвојени супернатанти су потом филтрирани кроз 0,22 µm PTFE (енгл. Polytetrafluoroethylene – политетрафлуороетилен) филтере (Chemland, Старгард, Пољска), а затим коришћени за даљу карактеризацију UHPLC Q-ToF MS карактеризацију. Закишељен метанол је изабран као екстракциони средство због чињенице да је најчешће и највише коришћен за екстракцију биоактивних компоненти из биљног материјала (Pintać et al., 2018; Rocchetti et al., 2020; Wojdyło et al., 2020; Acharya et al., 2021; Kolarević et al., 2021; Milinčić et al., 2021). Поред наведеног, овај растварач пружа највећи принос фенолних једињења (Pintać et al., 2018). У овом истраживању је урађена и додатна карактеризација веома осетљивих глукозинолата из микробиља броколија која је захтевала да узорци микробиља броколија буду екстраховани загрејаним метанолом (70 °C) и инкубирани сат времена на термо мешалици (70 °C) ради инактивације ензима мирозиназе (Liu et al., 2022). Добијени супернатант је затим центрифугуран и филтриран и даље коришћен за анализу глукозинолата применом течне-масене хроматографије.

Нешто другачија процедура је коришћена за припрему хладно цеђених сокова од микробиља. Сокови су пропуштени кроз SPE (енгл. Solid Phase Extraction – екстракција на чврстој фази) кертрице (CLEAN-UPR, C18 Extraction columns, Unendcapped-PKG50, UCT, Бристол, Велика Британија) непосредно пре извођења хроматографске анализе, у циљу уклањања шећера и осталих колоидних нечистоћа. SPE кертрици су кондиционирани пропуштањем закишељеног метанола (80%-и метанол са 0,1% HCl) и miliQ воде. Након тога, узорци сокова су пропуштени кроз кертрице и испрани са 5 mL miliQ воде. Адсорбоване биоактивне компоненте су затим елуиране са 1 mL закишељеног метанола, филтриране кроз 0,45 µm PTFE филтере и анализиране применом UHPLC Q-ToF MS анализе.

4.2.2.1.2. UHPLC Q-ToF MS анализа биоактивних компоненти микробиља и хладно цеђених сокова од микробиља

Фитохемијски профили екстракта микробиља и сокова микробиља броколија, цвекле и амаранта анализирају су коришћењем Agilent 1290 Infinity система ултра-ефикасне течне хроматографије (UHPLC) који је повезан са квадрупол и „time-of-flight“ масеним детекторима (6530C Q-ToF-MS) (Agilent Technologies, Inc., Санта Клара, Калифорнија, САД), према методи коју су детаљно описали Kostić et al. (2023). Q-ToF-MS систем је опремљен двоструким електроспреј јонским извором (ESI) који је радио у позитивном (ESI⁺) и негативном (ESI⁻) режиму јонизације. Хроматографско раздвајање извршено је на Zorbax C18 колони (2,1 × 50 mm, 1,8 µm) (Agilent Technologies, Inc., Калифорнија, САД) на температури од 40 °C. Коришћене су следеће мобилне фазе: (А) ултра чиста вода + 0,1% мравља киселина; и (Б) ацетонитрил + 0,1% мравља киселина (MS квалитета). Брзина протока мобилне фазе је била константна и износила је 0,3 ml/мин, док је ињектована запремина узорка била 5 µl. Коришћен је следећи градијент: 0-2 минута (98% А), 2-17 минута (98% А до 2% А), враћање на почетне услове (98% А), у следећих 5 минута, ради поновног уравнотежавања колоне и припреме за следеће ињектовање.

Q-ToF-MS систем је опремљен Agilent Jet Stream електроспреј јонизационим извором (ESI) који ради у позитивном (ESI⁺) и негативном (ESI⁻) јонизационом моду. Радни параметри јонског извора су били следећи: притисак у небулизатору (распршивача) (45 psi), температура гаса за сушење од 225 °C са брзином протока гаса од 8 l/мин, температура гасне чауре („sheath gas“) (300 °C) са протоком гаса од 10 l/мин, капиларни напон (2500 V), енергија фрагментора (175 V), напон на скимеру (65 V), и RF пик напон на октополу (750 V). Екстракти су анализирани у Auto MS/MS режиму аквизиције, са фиксно подешеном колизионом енергијом (30 eV), док су параметри за наведени режим били следећи: m/z = 100–1700, са фреквенцијом скенирања од 2 Hz, и брзина скенирања 1 спектар/s. Agilent Mass Hunter софтвер вер. 10.0 коришћен је за контролу инструмента, као и за прикупљање и анализу података.

Појединачни глюкозинолати, фенолна једињења и беталаини су идентификовани на основу њихових моноизотопских маса и MS фрагментације. Поред тога, претходно објављени подаци MS фрагментације у литератури коришћени су за потврду идентификације глюкозинолата (Cataldi et al., 2007; Clarke, 2010; Dong et al., 2021; Guo et al., 2020; Li et al., 2021; Castellanea et al., 2022), фенолних једињења (Isayenkova et al., 2006; da Silva et al., 2020; Milinčić et al., 2021; Liu et al., 2022) и беталаина (Herbach et al., 2005; Nemzer et al., 2011; Sawicki et al., 2019; Xie & Chen, 2021). Фенолна једињења су квантификована директним поређењем са доступним стандардима. Појединачна фенолна једињења за која нису постојали стандарди квантификована су коришћењем доступних стандарда (синапинска киселина за деривате фенолних киселина и апигенин за деривате флавоноида) и изражени су као mg еквивалената одговарајућег стандарда/100 g свеже масе микробиља (СММ) или 100 mL сока микробиља. **Табела П1** показује фенолна једињења коришћена за квантификацију, заједно са њиховим једначинама калибрационих крива и коефицијентима корелације. Релативни садржај појединачних беталаина у микробиљу цвекле и амаранта и у њиховим соковима (%) израчунат је посебно за сваки узорак, као однос површине пика сваког појединачног беталаина у односу на површину пика свих укупно детектованих беталаина. Тачне масе детектованих компонената су израчунате коришћењем ChemDraw софтвера (version 12.0, CambridgeSoft, Кембриџ, Масачусетс, САД).

4.2.2.2. Одређивање рН вредности, растворљиве суве материје, влаге и приноса

Одређивање рН вредности сокова од микробиља извршено је дигиталним рН метром (WTW inoLab), док је укупна растворљива сува материја (°Bx) мерена рефрактометром (ATC 0–32 Brix, Huixia Supply Co., Ltd., Фуџоу, Кина). Сува материја сокова од микробиља је одређена гравиметријском методом сушења у сушници на температури од 105 °C до постизања константне масе. Принос сокова од микробиља је израчунат као однос између масе добијеног сока (m_1) и масе полазне количине свежег микробиља (m_2), користећи следећу једначину:

$$\text{Принос сока (\%)} = \frac{m_1}{m_2} \times 100 \quad (1)$$

4.2.2.3. Спектрофотометријске анализе

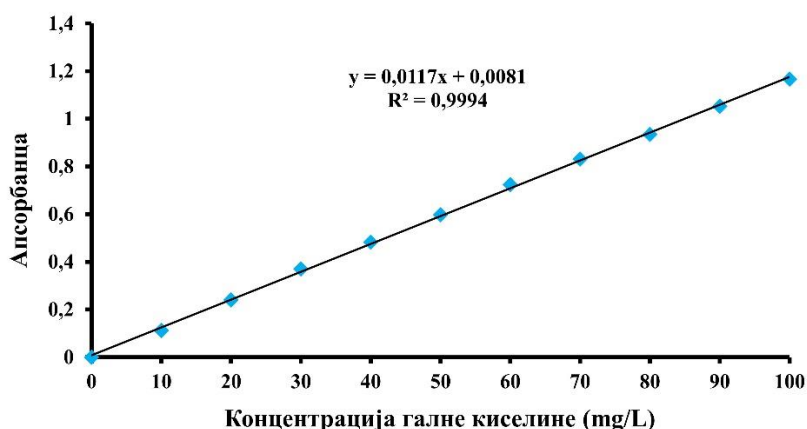
4.2.2.3.1. Одређивање садржаја укупних фенолних једињења

С обзиром на разноврсност фенолних једињења и њихове интерференције са другим супстанцама, као и потенцијалне реакције између нефенолних компонената у узорцима и реагенсима, тренутно не постоји идеална метода за тачно одређивање укупног садржаја фенолних једињења. Стога је у овој докторској дисертацији укупан садржај фенолних једињења у соковима микробиља одређен коришћењем најчешће примењиване методе коју су претходно пријавили Singleton et al. (1999). Ова метода је заснована на колориметријској реакцији између фенолних једињења у узорку и Folin–Ciocalteu реагенса, услед чега у

алкалној средини долази до промене боје из жуте у плаву (Singleton et al., 1999). Узорци сокова микробила су разблажени дестилованом водом, а затим је у тест епрувете отпипетирано по 0,5 mL разблажених узорака и додато по 2,5 mL 10% (v/v) Folin–Ciocalteu реагенса. Реакционе смеше су затим интензивно промешане на вортексу и остављене на тамном месту 5 минута. Након тога, у реакционе смеше је додато по 2 mL раствора 7,5% Na_2CO_3 , након чега су смеше интензивно промешане и остављене да се додатно инкубирају још 2 часа на тамном месту и собној температури. Слепа проба је припремљена паралелно са узорцима, а садржала је дестиловану воду уместо узорака. Након истека периода инкубације, мерена је апсорбанца на таласној дужини од 760 nm на HALO DB-20S UV-Vis спектрофотометру (Dynamica Scientific Ltd., Велика Британија).

Калибрациона крива је направљена коришћењем галне киселине као стандарда. Припремљен је основни раствор галне киселине у дестилованој води концентрације 100 mg/L, након чега је из њега припремљена серија разблажења у распону од 10 до 90 mg/L. Поступак за добијање вредности апсорбанци припремљених раствора галне киселине био је у складу са претходно описаним поступком за одређивање укупног садржаја фенолних једињења. Слепа проба је садржала дестиловану воду уместо раствора галне киселине. На основу добијених резултата апсорбанци добијена је калибрациона крива у функцији концентрације галне киселине $A = f(c)$ (Слика 4.3).

Концентрација укупних фенолних једињења у соку је израчуната коришћењем једначине калибрационе криве, а резултати су изражени у mg еквивалената галне киселине на 100 mL сока (mg GAE/100 mL).



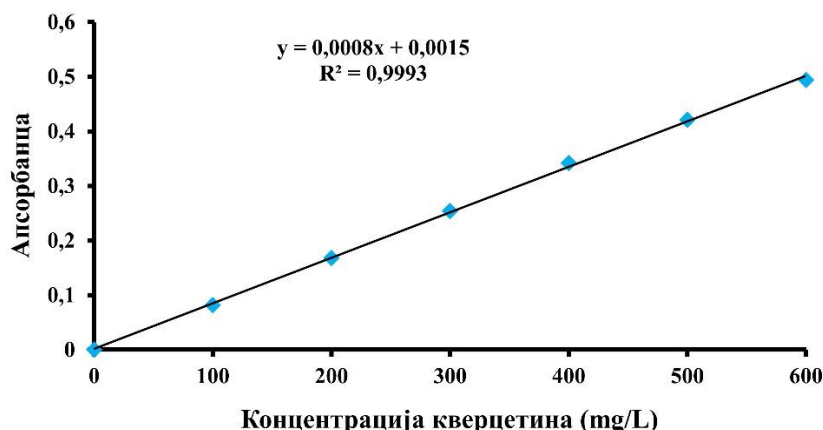
Слика 4.3. Калибрациона крива раствора галне киселине

4.2.2.3.2. Одређивање садржаја укупних флавоноида

Укупан садржај флавоноида је одређен спектрофотометријском методом са алуминијум хлоридом коју су претходно описали Zhishen et al. (1999) и Kolarević et al. (2021). Аликвот од 0,5 mL претходно разблажених узорака је отпипетиран у епрувете, заједно са 2 mL дестиловане воде, затим су смеше интензивно промешане на вортексу. Након тога, у реакционе смеше је додато 0,15 mL раствора 5% NaNO_2 , а после 5 минута, у све узорке је додато по 0,15 mL раствора 10% AlCl_3 . После инкубације у трајању од 6 минута у реакционе смеше је додат по 1 mL раствора 1M NaOH и по 1,2 mL дестиловане воде. Слепа проба је садржала дестиловану воду уместо узорака. Апсорбанца је мерена на таласној дужини од 510 nm.

Калибрациона крива је направљена коришћењем кверцетина као стандарда. Припремљен је основни раствор кверцетина у 80% v/v етанолу са концентрацијом од 600 mg/L, након чега је из њега припремљена серија разблажења у распону од 100 до 500 mg/L. Поступак за добијање вредности апсорбанци припремљених раствора кверцетина

био је у складу са претходно описаним поступком за одређивање укупног садржаја флавоноида. Слепа проба је садржала 80% v/v етанол уместо раствора кверцетина. На основу добијених резултата апсорбанци добијена је калибрациона крива у функцији концентрације кверцетина $A = f(c)$ (Слика 4.4).



Слика 4.4. Калибрациона крива раствора кверцетина

Концентрација садржаја укупних флавоноида у соку је израчуната коришћењем једначине калибрационе криве, а резултати су изражени у mg еквивалената кверцетина на 100 mL сока (mg QE /100 mL).

4.2.2.3.3. Одређивање садржаја бетацијанина, бетаксантина и укупног садржаја беталаина

Укупни садржај бетаксантина и бетацијанина одређен је у сагласности са спектрофотометријском методом коју су објавили Ravichandran et al. (2014) и Stintzing et al. (2003). Укупан садржај беталаина је приказан као сума укупних бетаксантина и бетацијанина. Апсорбанца је мерена на таласној дужини од 485 nm, 536 nm и 650 nm. Резултати су изражени у mg бетаксантина, бетацијанина и укупних беталаина по 100 mL сока и израчунати према следећој једначини:

$$\text{Бетаксантини (Бетацијанини) (mg/100 mL)} = \frac{A \times DF \times MW \times 100}{\epsilon \times L} \quad (2)$$

где је: $A=A_{485}-A_{650}$ (бетаксантини) и $A=A_{536}-A_{650}$ (бетацијанини), DF-фактор разблажења, MW – моларна маса (339 g/mol за бетаксантине и 550 g/mol за бетацијанине), ϵ – моларни екстинкциони коефицијент (48000 за бетаксантине и 60000 за бетацијанине), и L- дужина кивете (cm).

4.2.2.3.4. Одређивање садржаја хлорофила а и хлорофила б

Садржаји хлорофила а и хлорофила б су одређени спектрофотометријском методом коју су претходно описали Ali et al. (2020). Укратко, узорци сокова микробиља су екстраховани 80%-им ацетоном и мешани 3 часа на орбиталном шејкеру на 500 обр/мин. Након екстракције узорци су центрифугирани на 9000 обр/мин у трајању од 10 минута, након чега су одливени и коришћени за одређивање садржаја хлорофила. Узорци су разблажени 80%-им ацетоном, а апсорбанца је мерена на две таласне дужине (645 nm и 663 nm). Мерење је поновљено три пута. Резултати су редом изражени као mg хлорофила а и хлорофила б на 100 mL сока. Садржаји хлорофила а и хлорофила б израчунати су помоћу следећих једначина:

$$\text{Хлорофил а (mg/100 mL)} = (12,71 \times A_{663} - 2,59 \times A_{645}) \times DF/10 \quad (3)$$

$$\text{Хлорофил б (mg/100 mL)} = (12,71 \times A_{645} - 2,59 \times A_{663}) \times DF/10 \quad (4)$$

где је: DF-фактор разблажења, A – апсорбанца измерена на 645 nm и 663 nm.

4.2.2.3.5. Одређивање антиоксидативне активности

Антиоксидативна активност је одређена коришћењем следеће три методе: ABTS^{•+}, DPPH[•] и FRAP. Коришћење више метода за одређивање антиоксидативне активности оправдано је због различитих механизма деловања реагенса и постојања ограничења и специфичности према одређеним типовима узорака.

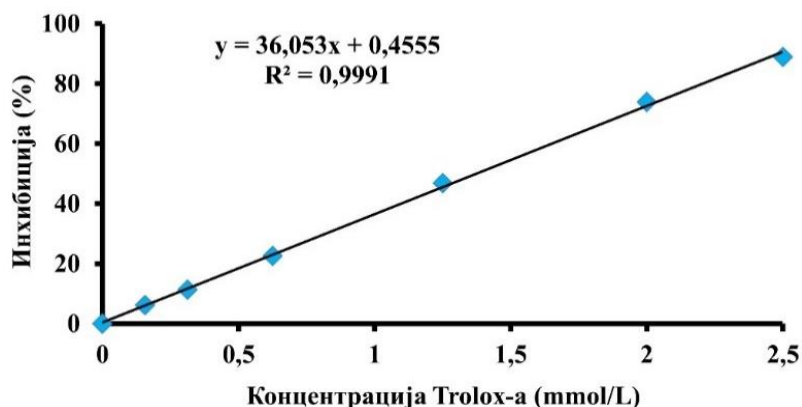
4.2.2.3.5.1. Одређивање антиоксидативне активности ABTS^{•+} методом

Процена способности уклањања ABTS^{•+} радикала је одређена ABTS^{•+} спектрофотометријском методом коју су претходно описали Re et al. (1999). Погодна је за одређивање антиоксидативне активности великог броја хидрофилних и липофилних антиоксиданата, као и вишекомпонентних екстраката хране. Метода се заснива на редукцији (сакупљању слободних/формираних) ABTS^{•+} радикала од стране антиоксиданата у узорку, што резултује променом боје која се одређује спектрофотометријски. ABTS^{•+} раствор (састављен од 14 mM ABTS^{•+} раствора у фосфатном пуферу и 4,9 mM раствора K₂S₂O₈ у фосфатном пуферу, помешаних у односу 1:1) направљен је минимум 16 часова пре коришћења, а потом је складиштен у одсуству светлости. Укратко, у тест епрувете је отпипетирано 30 µl узорака одговарајућег разблажења и одмах затим је додато 3 mL ABTS^{•+} радног раствора који је претходно сједињен са фосфатним пуфером у односу 1:80 и чија је апсорбанца подешена на 0,70 ± 0,02 на таласној дужини од 734 nm, након чега су смеше енергично промешане и остављене на тамном месту да се инкубирају 6 минута. Слепа проба је садржала дестиловану воду уместо узорака. Након истека периода инкубације апсорбанца је мерена на таласној дужини од 734 nm, а затим је израчунат проценат инхибиције (I (%)) коришћењем следеће једначине:

$$I(\%) = \frac{A_{\text{сп}} - A_{\text{уз}}}{A_{\text{сп}}} \times 100 \quad (5)$$

где је : A_{сп} – апсорбанца слепе пробе; A_{уз} – апсорбанца узорка.

Калибрациона крива је направљена коришћењем Trolox-а као стандарда. Основни раствор Trolox-а је припремљен у 5 mM фосфатном пуферу концентрације 2,5 mmol/L, а затим је од њега направљена серија разблажења у распону од 0,15625 до 2 mmol/L. Добијање апсорбанци на основу којих се рачуна проценат инхибиције ABTS^{•+} радикала за растворе Trolox-а био је у складу са претходно описаним поступком. Слепа проба је садржала фосфатни пуфер уместо раствора Trolox-а. На основу добијених резултата инхибиције направљена је калибрациона крива у функцији концентрације Trolox-а I (%) = f (c) (Слика 4.5).



Слика 4.5. Калибрациона крива раствора Trolox-a

Антиоксидативна активност је израчуната коришћењем једначине калибрационе криве раствора Trolox-a, а резултати су изражени у mg Trolox еквивалената на 100 mL сока (mg TE/100 mL).

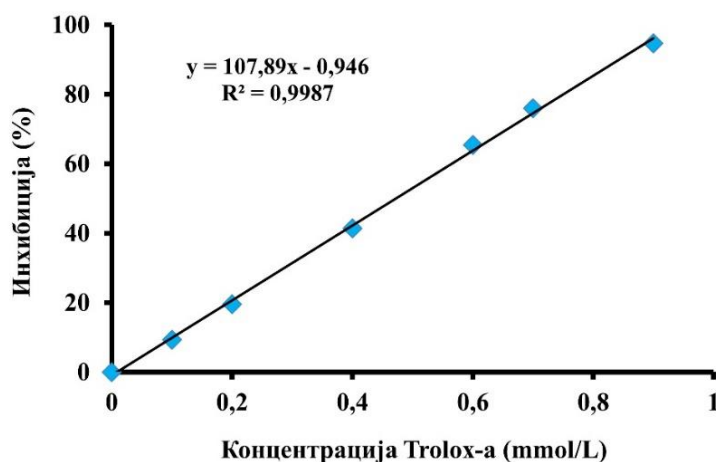
4.2.2.3.5.2. Одређивање антиоксидативне активности DPPH• методом

Процена способности редукције DPPH• радикала извршена је спектрофотометријском методом коју су претходно описали Brand-Williams et al. (1995). Метода је брза, валидна и лако изводљива, а принцип је заснован на редукцији (сакупљању) љубичастог DPPH• (2,2-дифенил-2-пикрилхидразил) радикала од стране антиоксиданата у жуто обојени дифенил-пикрилхидразин, при чему долази до смањења апсорпције на одређеној таласној дужини (Brand-Williams et al., 1995). Основни раствор DPPH• концентрације 0,094 mmol/L је растворен у метанолу непосредно пред почетак извођења методе. У тест епрувете су отпипетирани узорци одговарајућег разблажења (0,1 mL), а затим је додат раствор DPPH• (1,9 mL). Реакционе смеше су затим интензивно промешане на вортексу и остављене да се инкубирају 30 минута на собној температури заштићена од светлости. Слепа проба је садржала дестиловану воду уместо узорка. Након истека периода инкубације апсорбанца је мерена на таласној дужини од 517 nm, а затим је израчунат проценат инхибиције (I (%)) коришћењем следеће једначине:

$$I(\%) = \frac{A_{\text{сп}} - A_{\text{уз}}}{A_{\text{сп}}} \times 100 \quad (6)$$

где је : $A_{\text{сп}}$ – апсорбанца слепе пробе; $A_{\text{уз}}$ – апсорбанца узорка.

Калибрациона крива је направљена коришћењем Trolox-a као стандарда. Припремљен је основни раствор Тролох-а у метанолу концентрације 1 mmol/L, а затим је од њега направљена серија разблажења у распону од 0,1 до 0,9 mmol/L. Поступак за добијање апсорбанци на основу којих се рачуна проценат инхибиције DPPH• радикала за растворе Trolox-a одређен је према претходно описаном поступку. Слепа проба је садржала метанол уместо раствора Trolox-a. На основу добијених резултата инхибиције направљена је калибрациона крива у функцији концентрације Trolox-a $I(\%) = f(c)$ (Слика 4.6).



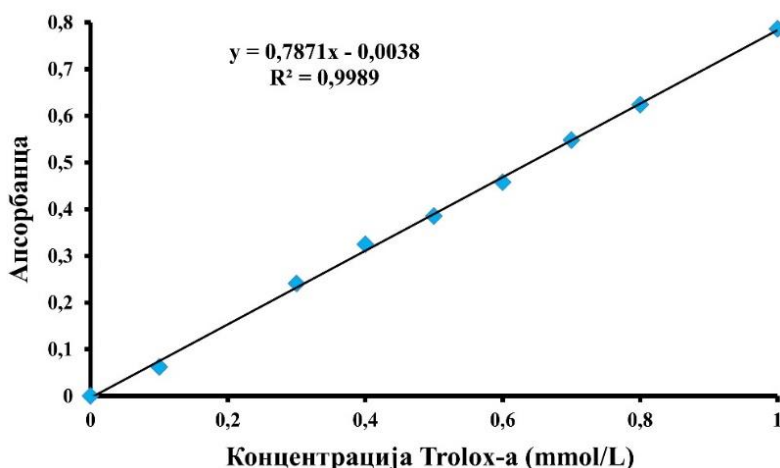
Слика 4.6. Калибрациона крива раствора Trolox-a

Антиоксидативна активност је израчуната коришћењем једначине калибрационе криве раствора Trolox-a, а резултати су изражени у mg Trolox еквивалената на 100 mL сока (mg TE/100 mL).

4.2.2.3.5.3. Одређивање антиоксидативне активности FRAP методом

Редукујућа моћ узорака сокова микробиља је одређена у складу са методом коју су претходно описали Benzie & Strain (1996). FRAP метода је заснована на редукцији фери-триспиридилтриазин комплекса (Fe(III)TPTZ) који је жуте боје, док у присуству антиоксиданата прелази у плаво обојен феро комплекс (Fe(II)TPTZ) у киселој средини (pH 3,6). У тест епрувете је отпипетирано 0,1 mL узорака одговарајућег разблажења и 0,3 mL дестиловане воде, након чега су смеше интензивно промешане. У реакционе смеше је затим додато 3 mL FRAP реагенса (који садржи 300 mM ацетатног пуфера са pH вредношћу од 3,60, 10 mM раствор 2,4,6-триспиридил-s-триазина (TPTZ) раствореног у 40 mmol HCl, и 20 mM FeCl₃·6H₂O раствореног у дестилованој води; наведени раствори су помешани непосредно пре анализе у запреминском односу 10:1:1). Смеше су интензивно промешане и остављене да се инкубира на 37 °C у трајању од 40 минута на воденом купатилу. Слепа проба је садржала дестиловану воду уместо узорака. Након истека периода инкубације апсорбанца је мерена на таласној дужини од 593 nm.

Калибрациона крива је направљена коришћењем Trolox-a као стандарда. Припремљен је основни раствор Trolox-a у дестилованој води концентрације 1 mmol/L, а затим је од њега направљена серија разблажења у распону од 0,1 до 0,9 mmol/L. Поступак за добијање вредности апсорбанци припремљених раствора Trolox-a био је у складу са претходно описаним поступком. Слепа проба је садржала дестиловану воду. На основу резултата апсорбанци добијена је калибрациона крива у функцији концентрације Trolox-a $A = f(c)$ (Слика 4.7).



Слика 4.7. Калибрациона крива раствора Trolox-a

Антиоксидативна активност је израчуната коришћењем једначине калибрационе криве раствора Trolox-a, а резултати су изражени у mg Trolox еквивалената на 100 mL сока (mg TE/100 mL).

4.2.2.4. Сензорно испитивање

Сензорно испитивање сокова од микробиља је обављено од стране обучених оцењивача и потрошача на Пољопривредном факултету Универзитета у Београду, у лабораторији Катедре за технологију конзервисања и врења, применом следеће две методе: метода за испитивање укупног сензорног квалитета производа и метода за испитивање сензорне прихватљивости производа од стране потрошача применом хедонске скале. Услови за спровођење сензорног испитивања хране у контролисаном окружењу били су у складу са ISO стандардима – ISO 8589:2007 и ISO 11136:2014. Узорци сокова микробиља броколија, цвекле и амаранта, који су били предмет сензорног испитивања, припремљени су на следећи начин: 1) микробиле је сечено, прано и цеђено помоћу соковника за хладно цеђење, 2) добијени сокови од микробиља су пренети у провидне чаше од 20 mL (како би се обезбедила добра видљивост узорка) и шифровани случајно изабраним троцифреним бројевима, након чега су сервирани оцењивачима. Температура сокова од микробиља приликом сервирања је била 8 °C, што је температура сличних сокова доступних на тржишту. Сензорно испитивање и оцењивање сокова од микробиља спроведено је у просторији са контролисаним условима, укључујући контролисану вентилацију за одвод страних мириса, контролисано осветљење белим светлом, као и одвојеност просторије за припрему узорка од просторије за сензорно испитивање. Негазирана вода и неслани крекери коришћени су за неутрализацију накнадног укуса после сваког узорка.

Услови за спровођење сензорних метода испитивања били су обезбеђени на тај начин да сваки оцењивач може објективно оценити производ. Све методе сензорног испитивања са оцењивачима биле су у складу са Кодексом професионалне етике Универзитета у Београду (Сенат Универзитета у Београду). Непосредно пред спровођење сензорног испитивања, сви оцењивачи дали су пристанак путем изјаве да пристају да учествују у овом истраживању, да су свесни да су њихови одговори строго поверљиви и да могу да се користе за потребе истраживања, да могу да се повуку из истраживања у било ком тренутку и да подаци о учесницима неће бити објављени без њиховог знања. Сви тестирани производи били су безбедни за употребу.

4.2.2.4.1. Метода бодовања

Одређивање укупног сензорног квалитета сокова од микробиља извршено је помоћу методе бодовања, узимајући у обзир следеће критеријуме: изглед, мирис, текстура и укус.

Оцењивање квалитета сокова извршено је коришћењем категоријске скале применом петобалног бодовног система, где се сензорни квалитет оцењује у оквиру бодовног опсега од 0 (незадовољавајући квалитет) до 5 (одличан квалитет), како су претходно описали Tomić et al. (2020). Како сензорна својства имају различит утицај на укупни квалитет, уведени су коефицијенти важности (КВ) за свако сензорно својство: 1 (изглед), 2 (мирис), 5 (текстура) и 8 (укус). Стога, оцена дата од стране оцењивача за свако појединачно сензорно својство множи се са одговарајућим, већ поменутиим коефицијентом важности, а на крају се збиром овако коригованих оцена добија оцена за укупан сензорни квалитет. Важно је напоменути да сензорно испитивање сокова применом методе бодовања подразумева учествовање само обучених оцењивача (у складу са ISO стандардом - ISO 8586:2012) који добро познају технолошки процес производње хладно цеђених сокова и који су способни да препознају уобичајене мане производа и њихов утицај на укупни квалитет. Оцењивачи су користили упутство за оцењивање сензорног квалитета сокова од микробиља. За потребе овог испитивања учествовало је 10 обучених оцењивача запослених на Пољопривредном факултету, који су присуствовали тренинзима током 2 недеље по 2 часа ради упознавања са самим производом и његовим карактеристикама.

4.2.2.4.2. Хедонска скала

За испитивање сензорне прихватљивости производа од стране потрошача коришћена је хедонска скала са 9 подеока (Lawless & Heymann, 2010). Скала је подељена на два дела: први део чине вредности од 1 до 4, које означавају степен „недопадања“ производа, док други део скале представљају вредности од 6 до 9 које симболизују степен „допадања“ производа од стране оцењивача. Централна вредност (5) на скали симболизује индиферентан став оцењивача према производу, односно она је вербализована у изјави: "нити ми се допада/нити ми се не допада испитивани производ". Хедонска скала припада афективним/хедонистичким тестовима који имају за циљ да испитају степен допадљивости производа потрошачима који су конзументи испитиваног производа (Tomić et al., 2017; Petrović et al., 2021). Самим тим, оцењивачи учесници у овом тесту морају бити и потрошачи испитиваног производа, у овом случају хладно цеђених сокова. Оцењивачи су имали задатак да оцене производ у погледу укупне прихватљивости и прихватљивости одређених сензорних својстава (боја, текстура, укус и мирис). Да би се обезбедила апсолутна независност оцењивања производа, оцењивачи нису могли да пореде своје оцене једни са другима или да врше поређење између узорака. Оцењивачи су били слободни да опишу сваку сензацију коју су доживели приликом сензорног оцењивања. Нумерички подаци добијени применом хедонске скале изражени су као средње вредности у радар дијаграму.

У испитивању прихватљивости производа коришћењем хедонске скале учествовала су оцењивачи који редовно конзумирају цеђене сокове, од којих 57% чине мушкарци, а 43% жене, са просечном старашћу од 29 година. Постојали су следећи критеријуми за избор оцењивача: 1) морају бити потрошачи ових производа, и 2) не смеју имати здравствене проблеме, посебно у погледу функционисања чула и здравља зуба.

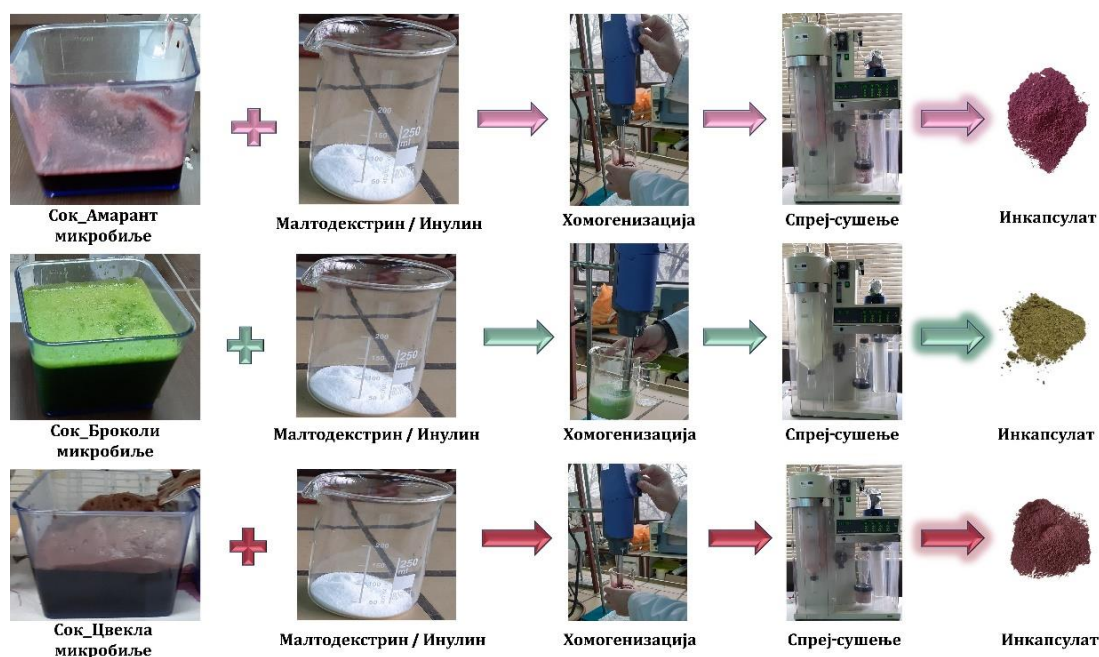
4.2.3. Микроинкапсулација сокова од микробиља спреј сушењем

Смеша носача и сокова од микробиља броколија, цвекле и амаранта сушена је помоћу Mini B290 лабораторијског спреј сушача (BÜCHI, Labortechnik AG, Флавил, Швајцарска) са млазницом пречника 0,7 mm, а у циљу добијања спреј осушених инкапсулираних сокова од микробиља. Спреј сушење је изведено под следећим условима: улазна температура од 130 °C, излазна температура од 72 °C, аспирација од 100% и брзина довода течности од 10 mL/min. Непосредно пре спреј сушења, узорци сокова микробиља су филтрирани помоћу стерилне четворослојне памучне газе како би се уклониле чврсте честице из сокова. Након тога, припремљена је напојна смеша са носачима (малтодекстрином или инулином) и соковима од микробиља у односу 10 g/100 g, а затим је добијена смеша енергично

промешана (хомогенизована) помоћу уређаја Ultra-Turrax (IKA homogenizer, Немачка) на 10 000 обр/мин током 5 минута. Овако добијена суспензија је представљала раствор за напајање који је подвргнут спреј сушењу. Након завршеног спреј сушења, добијени инкапсулати су вакуум-паковани помоћу вакумирке у пластичне кесе и складиштени у фрижидеру на температури од 4 °C до даљих анализа. Процес добијања инкапсулата од сокова микробиља спреј сушењем је приказан на **Слици 4.8**.

Преглед назива инкапсулираних и контролних узорака са одговарајућим скраћеницама:

- Спреј осушени сок од микробиља амаранта без носача – контрола (**АК**);
- Спреј осушени сок од микробиља броколија без носача – контрола (**БК**);
- Спреј осушени сок од микробиља цвекле без носача – контрола (**ЦК**);
- Спреј осушени инкапсулирани сок од микробиља амаранта унутар малтодекстрина (**АМД**);
- Спреј осушени инкапсулирани сок од микробиља амаранта унутар инулина (**АИН**);
- Спреј осушени инкапсулирани сок од микробиља броколија унутар малтодекстрина (**БМД**);
- Спреј осушени инкапсулирани сок од микробиља броколија унутар инулина (**БИН**);
- Спреј осушени инкапсулирани сок од микробиља цвекле унутар малтодекстрина (**ЦМД**);
- Спреј осушени инкапсулирани сок од микробиља цвекле унутар инулина (**ЦИН**).



Слика 4.8. Процес добијања инкапсулата од сокова микробиља спреј сушењем

4.2.4. Карактеризација инкапсулата

4.2.4.1. Хроматографска анализа инкапсулата

4.2.4.1.1. Припрема инкапсулата за хроматографску анализу

Припрема узорака за хроматографску анализу обухватала је екстракцију инкапсулата закишељеним метанолом (80%-и метанол који садржи 0,1% HCl), а затим интензивно мешање на механичкој мешалици током једног сата. Након екстракције, узорци су центрифугирани на 4000 обр/мин у трајању од 10 минута, а добијени супернатанти су филтрирани кроз PTFE филтер са порама величине 0,22 μm .

4.2.4.1.2. UHPLC Q-ToF MS анализа биоактивних компоненти инкапсулата

UHPLC Q-ToF MS анализа биоактивних компоненти инкапсулата извршена је према методи описаној у **Потпоглављу 4.2.2.1.2.**, а због непостојања специфичних стандарда, садржај идентификованих фенолних једињења је семи-квантификован помоћу структурно најближих стандарда, тако је гентизинска киселина коришћена за фенолне киселине ($Y=1726721,32 \times X + 466061,06$; $r=0,9962$; $LOQ=3,33 \mu\text{g/mL}$) а витексин 2''-О-рамнозид (**ВР**) ($Y=5460525,97 \times X + 1048857,26$; $r=0,9982$; $LOQ=1,18 \mu\text{g/mL}$) за квантификацију апигенин С-гликозида, док су резултати изражени као mg еквиваленти одабраних стандарда на 100 g суве материје узорка (**СМ**). Релативни садржај беталаина (%) за сваки узорак посебно је израчунат као однос површине пика сваког појединачног беталаина у односу на укупну површину пика свих детектованих беталаина.

4.2.4.2. Физичко-хемијска карактеризација

Принос инкапсулације (ПИ) израчунат је као однос између суве материје добијених инкапсулата (m_1) и збира суве материје сокова од микробила и носача (малтодекстрин или инулин) (m_2), према следећој једначини (Tsali & Goula, 2018):

$$PI (\%) = \frac{m_1}{m_2} \times 100 \quad (7)$$

Ефикасност инкапсулације (ЕЕ) је одређена као однос инкапсулираног садржаја фенолних једињења (ЕРС) и укупних фенолних једињења садржаних у инкапсулатима сока од микробила (ТПС) (Marković et al., 2024). Садржај инкапсулираних фенолних једињења (ЕРС) израчунат је из разлике укупних фенолних једињења (ТПС) и површинских фенолних једињења (СПС). **ЕЕ** је израчуната коришћењем следеће једначине (Tumbas Šaropјас et al., 2016; Tsali & Goula, 2018):

$$EE (\%) = \frac{EPC}{TPC} \times 100 = \frac{TPC - SPC}{TPC} \times 100 \quad (8)$$

За одређивање садржаја укупних фенолних једињења у инкапсулатима (ТПС) и садржаја фенолних једињења на површини инкапсулата (СПС) коришћена су два различита растварача. Дестилована вода је коришћена као растварач за одређивање укупног садржаја фенолних једињења (ТПС), док је смеша етанола и метанола (50:50 v/v) коришћена за одређивање садржаја фенолних једињења на површини инкапсулата (СПС). Укратко, 100 mg инкапсулата је додато у 5 mL одговарајућег растварача, затим је смеша енергично промешана на вортексу током једног минута, а потом центрифугирана на 4000 obr/min у трајању од два минута. Издвојени супернатант је филтриран и коришћен за одређивање садржаја укупних фенолних једињења помоћу методе описане у **Потпоглављу 4.2.2.3.1.** Резултати су изражени као mg еквивалената галне киселине на 100 g суве материје инкапсулата ($\text{mg GAE}/100 \text{ g}$ **СМ**).

Сува материја (СМ) и **садржај влаге (СВ)** су одређени сушењем узорка у сушници на 105°C до постизања константне масе. Сува материја и садржај влаге у узорцима су израчунати коришћењем следећих једначина:

$$CM (\%) = \frac{\text{Маса осушеног узорка}}{\text{Иницијална маса узорка пре сушења}} \times 100 \quad (9)$$

$$CB (\%) = 100 - CM \quad (10)$$

Насипна густина и тапкана густина су одређене према методи коју су предложили студије Nishad et al. (2017), са малим изменама. За потребе одређивања насипне густине, маса од 2 g инкапсулата је измерена на аналитичкој ваги и пренета у мензуру од 10 mL, а затим је очитана запремина коју инкапсулат заузима, при чему је коришћењем **једначине 11** израчуната насипна густина. Са друге стране, одређивање тапкане густине је подразумевало да се иста количина (2 g) инкапсулата пренесе у мензуру од 10 mL и онда тапка 10, 150, 250 и 500 пута. Запремина коју је инкапсулат заузимао након тапкања од 500 пута је коришћена за израчунавање тапкане густине, која представља однос масе инкапсулата пре тапкања и запремине коју инкапсулат заузима након 500 тапкања (**једначина 12**).

$$\rho_{\text{Насипна густина}} = \frac{\text{Маса инкапсулата (g)}}{\text{Запремина инкапсулата (mL)}} \quad (11)$$

$$\rho_{\text{Тапкана густина}} = \frac{\text{Маса инкапсулата (g)}}{\text{Запремина инкапсулата након тапкања (mL)}} \quad (12)$$

Индекс компресибилности (**CI**) и Хауснеров однос (**HR**) је одређен коришћењем **једначина 13** и **14** (Коџ & Dirim, 2018). CI и HR се најчешће користе за одређивање вредности проточности и кохезивности прахова.

$$CI (\%) = \frac{\rho_{\text{Тапкана густина}} - \rho_{\text{Насипна густина}}}{\rho_{\text{Тапкана густина}}} \quad (13)$$

$$HR = \frac{\rho_{\text{Тапкана густина}}}{\rho_{\text{Насипна густина}}} \quad (14)$$

У **Табели П2** је приказана класификација проточности и кохезивности инкапсулата базирана на основу CI и HR вредности.

4.2.4.3. Одређивање боје

Боја инкапсулата добијених спреј сушењем је одређена помоћу ручног хромаметра Chroma Meter CR-400 (Konica, Minolta, Токио, Јапан). CIELab параметри боје (L^* , a^* и b^* вредности) су добијени коришћењем D65 извора светлости и угла посматрања од 2° . Мерење боје узорака извршено је у трипликатима. Параметри chroma (C^*) и hue (h°) су израчунати на основу a^* и b^* вредности (**једначина 15** и **16**). Chroma (C^*) означава засићеност, а hue (h°) нијансу боје.

$$C^* = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}} \quad (15)$$

$$h^\circ = \arctan\left(\frac{b^*}{a^*}\right) \quad (16)$$

4.2.4.4. Морфолошке карактеристике

Микроструктура и морфологија контролних узорака и инкапсулата испитивани су помоћу скенирајућег електронског микроскопа (SEM, Jeol JSM-6390LV, Токио, Јапан). Непосредно пре снимања, инкапсулати су обложени танким слојем злата (Baltec SCD 005 Sputter Coater, Scotia, Њујорк, САД) коришћењем струје од 30 mA током 100 s са удаљености од 50 mm. Инкапсулати су анализирани при увећању од 1200 x у контролисаним условима на

15 kV. Величина честица инкапсулата је израчуната коришћењем програма ImageJ (National Institute of Health, Bethesda, Мериленд, САД), мерењем пречника најмање 200 честица на SEM сликама.

4.2.4.5. ATR-FTIR спектроскопија

Молекуларна структура носача, контролних узорка и инкапсулата, одређена је инфрацрвеном спектроскопијом са Фуријеовом трансформацијом са модулом пригушене укупне рефлексije (ATR-FTIR). Спектри су снимљени коришћењем инфрацрвеног спектрометра са Фуријеовом трансформацијом IRAffinity-1 (Shimadzu, Кјото, Јапан) са 100 акумулираних скенирања по спектру и спектралном резолуцијом од 4 cm^{-1} , у спектралном подручју између 4000 и 500 cm^{-1} . За обраду спектра коришћен је Spectragryph – optical spectroscopy софтвер (Menges, 2020).

4.2.4.6. Спектрофотометријске анализе инкапсулата

4.2.4.6.1. Припрема инкапсулата за спектрофотометријску анализу

За спектрофотометријско одређивање укупног садржаја биоактивних компоненти и антиоксидативне активности, сви узорци инкапсулата су растворени у дестилованој води, а затим центрифугирани на 9000 обр/мин у трајању од 5 минута. Добијени супернатант је даље коришћен за спектрофотометријске анализе према устаљеним методама.

4.2.4.6.2. Спектрофотометријско одређивање укупног садржаја фенолних једињења, флавоноида и беталаина

Спектрофотометријско одређивање укупног садржаја фенолних једињења (TPC), флавоноида (TFC) и садржаја бетаксантина, бетацијанина и укупних беталаина (TBC) извршено је према методама описаним у **Потпоглављима 4.2.2.3.1., 4.2.2.3.2. и 4.2.2.3.3.,** респективно. Резултати одређивања укупног садржаја фенолних једињења, флавоноида и беталаина су изражени као mg еквивалената галне киселине (mg GAE/100 g CM), mg еквивалената кверцетина (mg QE/100 g CM) и mg беталаина (mg бетаксантина, бетацијанина и укупних беталаина/100 g CM) на 100 g суве материје инкапсулата (CM), респективно.

4.2.4.6.3. Спектрофотометријско одређивање антиоксидативне активности

Спектрофотометријско одређивање антиоксидативне активности узорка инкапсулата коришћењем ABTS⁺•, DPPH• и FRAP метода извршено је према процедурама описаним у **Потпоглављу 4.2.2.3.5.** Резултати одређивања антиоксидативне активности коришћењем ABTS⁺•, DPPH• и FRAP метода су изражени као mg Trolox еквивалената на 100 g суве материје инкапсулата (mg TE/100 g CM).

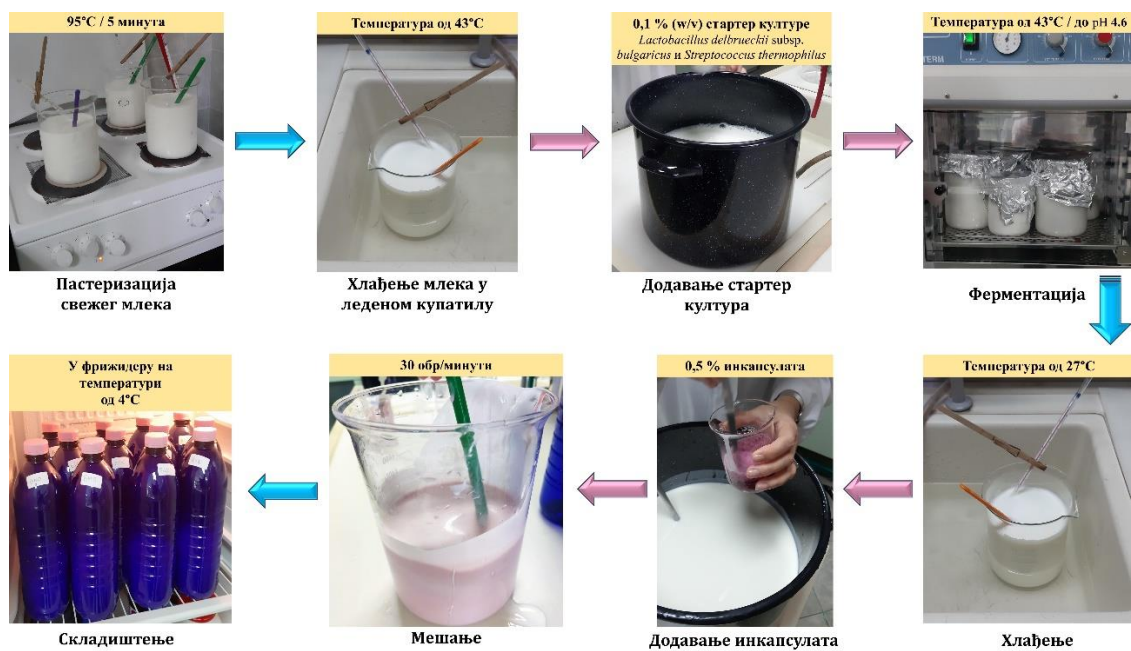
4.2.5. Производња јогурта обогаћених инкапсулатима сокова од микробиља

Примена добијених инкапсулата укључивала је производњу и обогаћивање јогурта инкапсулатима сокова од микробиља. Од свежег млека са 2,8% млечне масти и 3,0% протеина (Имлек, Србија) произведени су јогурти кроз неколико фаза производње, као што су: 1) пастеризација; 2) хлађење; 3) инокулација; 4) мешање; 5) ферментација; 6) хлађење; 7) обогаћивање инкапсулатима и 8) складиштење. У наставку је укратко описана свака од наведених фаза. Свеже кравље млеко је загревано и пастеризовано на 95 °C у трајању од 5 минута, а затим охлађено на температуру од 43 °C. Након тога, у охлађено млеко је додато 0,1% (w/v) јогуртне стартер културе Yoflex 812 (Chr Hansen, Ниеувегеин, Холандија) која је садржала две врсте бактерија – *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *bulgaricus* и *Streptococcus thermophilus*. У циљу обезбеђивања бољег контакта пастеризованог млека и јогуртне стартер културе, инокулисано млеко је лагано мешано 3 минута, а затим пренето у стаклене посуде. Ферментација је потом извршена у термостату на 43 °C и трајала је до постизања одређеног

нивоа киселости (pH 4,6). Ферментисано млеко је охлађено на температуру од 27 °C, а затим је извршено додавање 0,5% инкапсулата уз лагано мешање како би се спречило дезинтегрисање структуре јогурта. Сви јогурти су чувани у фрижидеру на температури од 4 °C у трајању од две недеље. Контролни јогурт без инкапсулата припремљен је на исти начин као јогурт са додатком инкапсулата. **Слика 4.10** приказује поступак производње јогурта обогаћених инкапсулатима.

Преглед назива обогаћених јогурта инкапсулатима сокова од микробиља унутар одговарајућих носача:

- Јогурт без додатка инкапсулата – контролни јогурт (К);
- Јогурт обогаћен инкапсулатима сока од микробиља амаранта унутар малтодекстрина (ЈО-АМД);
- Јогурт обогаћен инкапсулатима сока од микробиља амаранта унутар инулина (ЈО-АИН);
- Јогурт обогаћен инкапсулатима сока од микробиља броколија унутар малтодекстрина (ЈО-БМД);
- Јогурт обогаћен инкапсулатима сока од микробиља броколија унутар инулина (ЈО-БИН);
- Јогурт обогаћен инкапсулатима сока од микробиља цвекле унутар малтодекстрина (ЈО-ЦМД);
- Јогурт обогаћен инкапсулатима сока од микробиља цвекле унутар инулина (ЈО-ЦИН).



Слика 4.9. Поступак производње јогурта обогаћених инкапсулатима сокова од микробиља

4.2.6. Карактеризација обогаћених јогурта инкапсулатима сокова од микробиља

4.2.6.1. Текстурална својства

Текстурална својства као што су: чврстоћа, конзистенција, кохезивност и индекс вискозности су анализирани коришћењем TA.XT Plus texture analyzer (Stable Micro Systems, Годалминг, Велика Британија) након производње јогурта. Тест повратне екструзије је спроведен коришћењем ћелије за оптерећење од 5 kg на температури од 5 °C и коришћењем

сонде са хелијским диском пречника 35 mm (A/BE), која се спуштала брзином од 0,001 m/s на дубину од 30 mm, а затим се враћала у првобитан положај. Анализа је рађена у трипликатима.

4.2.6.2. Одређивање индукованог синерезиса и рН вредности

Одређивање рН вредности извршено је коришћењем дигиталног рН метра (Consort, Турнаут, Белгија). Одређивање индукованог синерезиса извршено је методом коју су претходно описали Flores-Mancha et al. (2021), са малим модификацијама. Око 10 g јогурта пребачено је у пластичну кивету запремине 50 mL, а потом центрифугирано на 3000 обр/мин на центрифуги (Eppendorf AG 5430, Хамбург, Немачка) у трајању од 10 минута на температури од 4 °C. Након тога извршено је мерење издвојеног супернатанта, а проценат синерезиса израчунат је помоћу следеће једначине:

$$\text{Синерезис (\%)} = \frac{\text{маса издвојеног супернатанта (g)}}{\text{почетна маса јогурта (g)}} \times 100 \quad 17$$

4.2.6.3. Одређивање боје

Одређивање боје узорака јогурта извршено је према методи описаној у **Поглављу 4.2.4.3.**

4.2.6.4. Спектрофотометријске анализа јогурта

4.2.6.4.1. Припрема јогурта за спектрофотометријску анализу

У циљу припреме добијених јогурта за спектрофотометријску анализу, примењен је поступак лиофилизације коришћењем лабораторијског лиофилизатора (INOFD-10S, Amtast, САД). Након лиофилизације, узорци су одмашћени хексаном и енергично мешани на лабораторијској тресилици у трајању од једног часа. Након тога, узорци су центрифугирани на 4000 обр/мин у трајању од 5 минута, при чему је супернатант одливен, а чврсти део поново подвргнут процесу одмашћивања хексаном и поново центрифугиран. Након двоструког процеса одмашћивања, узорци су остављени преко ноћи у дигестору како би испарили остаци хексана. Узорци су затим самлевени у циљу добијања финог праха погодног за даље анализе. Фино уситњени узорци (прахови) су растворени у дестилованој води и затим коришћени за спектрофотометријске анализе. Спектрофотометријске анализе изведене су коришћењем UV–Vis микроплејт (енгл. *microplate*) спектрофотометра (FlexA-200, Amtast, Лакеленд, Филадельфија, САД).

4.2.6.4.2. Спектрофотометријско одређивање фенолних једињења

Одређивање укупног садржаја фенолних једињења је извршено методом описаном у **Поглављу 4.2.2.3.1.**, уз мале модификације. Узорци одговарајућег разблажења су отпипетирани у количини од 35 µl и пренети у епендорф тубе, где је затим додат Folin-Ciocalteu реагенс у количини од 150 µl, након чега су реакционе смеше енергично промешане и остављене да се инкубирају 5 минута на собној температури. Након истека периода инкубације, 7,5% раствор Na₂CO₃ је додат у количини од 115 µl, смеше су енергично помешане и остављене на инкубацији 90 минута на тамном месту на собној температури. Слепа проба је припремљена паралелно са узорцима, а садржала је дестиловану воду уместо узорака. Након тога мерена је апсорбанца на таласној дужини од 765 nm.

Концентрација укупних фенолних једињења у јогурту је израчуната коришћењем једначине калибрационе криве ($y = 0,0093x + 0,1354$; $R^2 = 0,9961$), а резултати су изражени у mg еквивалената галне киселине на 100 g јогурта (mg GAE/100 g).

4.2.6.4.3. Спектрофотометријско одређивање антиоксидативне активности

4.2.6.4.3.1. ABTS^{•+} метода

За одређивање антиоксидативне активности коришћена је ABTS^{•+} метода која је претходно описана у **Потпоглављу 4.2.2.3.5.1.**, уз мале модификације. Аликвоти од 15 μl узорака пренети су у епендорф тубе, а одмах затим је додато 300 μl радног раствора ABTS^{•+}. Реакционе смеше су затим енергично промешане на вортексу у трајању од једног минута, а затим центрифугиране на 17000 обр/мин у трајању од 5 минута (период инкубације), након чега су супернатанти отпипетирани у бунариће на микротитар плочи. Слепа проба је припремљена паралелно са узорком, а садржала је дестиловану воду уместо узорака. Апсорбанца је мерена на таласној дужини од 734 nm.

Антиоксидативна активност је израчуната коришћењем једначине калибрационе криве раствора Trolox-a ($y = 0,3276x - 0,082$; $R^2 = 0,9972$), а резултати су изражени у mg Trolox еквивалената на 100 g јогурта (mg TE/100 g).

4.2.6.4.3.2. FRP метода

Способност редукције Fe³⁺ јона узорака јогурта одређена је применом FRP методе коју су описали Medouni-Adrar et al. (2015), уз мале модификације. Аликвоти од по 250 μl узорака одговарајућег разблажења помешани су са 250 μl раствора 200 mM фосфатног пуфера, затим су смеше енергично промешане на вортексу. Након тога, у реакционе смеше додат је 1% раствор калијум-ферицијанида, смеше су промешане и остављене да се инкубирају на 50 °C у воденом купатилу у трајању од 20 минута. Након истека периода инкубације, реакционим смешама је додато 250 μl раствора 10% трихлорсирћетне киселине, смеше су промешане и центрифугиране на 17000 обр/мин у трајању од 5 минута. Издвојени супернатанти су затим помешани са 500 μl дестиловане воде и 100 μl раствора 0,1% FeCl₃, након чега су смеше интензивно промешане на вортексу и остављене да се инкубирају на собној температури и на тамном месту 10 минута. Апсорбанца је мерена на таласној дужини од 700 nm. Слепа проба садржала је дестиловану воду уместо узорака.

Антиоксидативна активност је израчуната коришћењем једначине калибрационе криве раствора Trolox-a ($y = 0,0111x - 0,1856$; $R^2 = 0,9954$), а резултати су изражени у mg Trolox еквивалената на 100 g јогурта (mg TE/100 g).

4.2.6.5. Сензорна анализа

Сензорна анализа јогурта обогаћених инкапсулатима је извршена у циљу испитивања укупног сензорног квалитета јогурта и прихватљивости истих од стране потрошача, а према претходно описаним методама у **Потпоглављу 4.2.2.4.**

4.2.7. Статистичка обрада података

Статистичка обрада резултата извршена је коришћењем софтверског пакета SPSS Statistics 25.0 (IBM, Армонк, Њујорк, САД). Резултати су представљени као средње вредности израчунате на основу три понављања $\pm$ стандардна девијација. Утврђивање статистички значајних разлика између средњих вредности коришћена је анализа варијансе (one-way ANOVA), након чега је извршено *post hoc* поређење Duncan тестом вишеструких интервала. Хомогеност варијансе тестирана је применом Levene тестом, док је нормалност података процењена Shapiro-Wilk тестом. Колмогоров-Смирновим тестом нормалности је утврђено одступање величине честица инкапсулата и контролних узорака од нормалне (Гаусове) расподеле. Пирсонов коефицијент корелације (r) коришћен је за утврђивање корелације на нивоу значајности $p < 0,05$. За све примењене тестове ниво статистичке значајности постављен је на $p < 0,05$.

5. РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЈА

5.1. Хладно цеђени сокови од микробиља

Циљ овог дела докторске дисертације је био карактеризација микробиља броколија, цвекле и амаранта, као и производња хладно цеђених сокова од микробиља броколија (БМБ), цвекле (ЦМБ) и амаранта (АМБ), затим њихова карактеризација биоактивних компонената, антиоксидативних својстава и сензорних карактеристика. Примена технологије хладног цеђења у производњи сокова од микробиља представља физичку екстракцију без примене топлоте. Циљ је добијање сокова са високим концентрацијама биоактивних компонената. Додатно је испитан ефекат хладног цеђења на нутритивни састав микробиља, као и трансформације биоактивних компонената из микробиља током процеса хладног цеђења.

5.1.1. UHPLC Q-ToF MS анализа биоактивних компонената микробиља броколија, цвекле и амаранта

Главне класе биоактивних компонената у микробиљу броколија, цвекле и амаранта су идентификоване путем UHPLC Q-ToF MS система, узимајући у обзир нађене m/z масе молекуларних јона, типичне MS фрагментације и доступне податке из литературе (Isayenkova et al., 2006; Cataldi et al., 2007; Nemzer et al., 2011; Sawicki et al., 2019; Guo et al., 2020; Xie & Chen, 2021; Liu et al., 2022; Castellaneta et al., 2022). Као што је очекивано, глукозинолати (ГЛЗ) су идентификовани само у микробиљу броколија. У различитим екстрактима микробиља броколија је идентификовано укупно 7 глукозинолата (Табела 5.1).

Табела 5.1. Карактеризација глюкозинолата у микробиљу броколија коришћењем UHPLC Q-ToF MS уређаја. За сваки детектован глюкозинолат дат је назив хемијског једињења, ретенционо време (**tR**), молекулска формула, израчуната маса, нађена маса и MS фрагменти.

Број	tR	Молекулска формула	Израчуната маса	mDa	Назив једињења	Нађена маса m/z	MS фрагменти	БМБ	БМБ1	Референце
1	1,72	C ₁₁ H ₁₈ NO ₉ S ₂ ⁻	372,0423	-5,00	Глуконапин	372,0473	130(100),195,259,275,241,291,139	-	+	(Cataldi et al., 2007; Guo et al., 2020; Castellaneta et al., 2022)
2	6,71	C ₁₅ H ₂₀ NO ₉ S ₂ ⁻	422,0579	-2,60	Глуконастуртин	422,0605	205(100),247,164,259,275,180,226,244,342	+	-	
3	6,14	C ₁₆ H ₁₉ N ₂ O ₉ S ₂ ⁻	447,0532	-4,15	Глукобрасицин	447,0574	130(100),259,205,447,275,165,195	+	+	
4	1,77	C ₁₆ H ₁₉ N ₂ O ₁₀ S ₂ ⁻	463,0481	-4,35	4-Хидрокси-глукобрасицин	463,0525	169(100),160,221,259,275,195,463,205,285,383,267,241,186,176	+	+	
5	2,56	C ₁₆ H ₁₉ N ₂ O ₁₀ S ₂ ⁻	463,0481	-4,35	5- Хидрокси-глукобрасицин	463,0525	169(100),160,221,259,267,275,195,205,285,463	+	+	
6	7,13	C ₁₇ H ₂₁ N ₂ O ₁₀ S ₂ ⁻	477,0638	-4,54	Нео-глукобрасицин	477,0683	477(100),259,275,284,235,195,241,145	+	+	
7	7,88	C ₁₇ H ₂₁ N ₂ O ₁₀ S ₂ ⁻	477,0638	-4,54	4-Метокси-глукобрасицин	477,0683	167(100),259,205,241,275,282,285,195,315,447	+	+	

Скраћенице: БМБ – микробиље броколија екстраховано са 80% закишељеним метанолом на собној температури; БМБ1 – микробиље броколија екстраховано са 70% загрејаним метанолом на термошејкеру на температури од 70 °C. „+“ – детектовани глюкозинолати.

Идентификација глукозинолата у микробиљу броколија извршена је помоћу течне хроматографије коришћењем два екстракта микробиља броколија, а све у циљу добијања бољег увида у ГЛЗ профиле, због њихове нестабилности и брзе хидролизе до различитих производа разградње (Le et al., 2020; Alloggia et al., 2023). Глукобрасицин и његови деривати били су детектовани у оба екстракта микробиља броколија, што је у сагласности са другим студијама које су анализирале микробиље броколија (Di Bella et al., 2021; Zeng et al., 2022; Demir et al., 2023). Међутим, глуконапин и глуконастуртин детектовани су у различитим екстрактима микробиља броколија, у зависности од врсте коришћеног екстракта и услова под којима је извршена екстракција. Одсуство глуконапина у БМБ екстракту вероватно је последица његове повећане осетљивости на активност ензима мирозиназе. Са друге стране, присуство глуконастуртина у поменутом екстракту може бити последица различитих поларитета растварача који су коришћени за екстракцију ГЛЗ компоненти, као и боље тенденције закишељеног 80%-ог метанола да екстрахује ово једињење. Занимљиво је да глукозинолат познат као глукорафанин није детектован, иако је пријављен у већини студија као доминантан глукозинолат у микробиљу броколија (Le et al., 2020; Zeng et al., 2022; Demir et al., 2023). Одсуство овог глукозинолата у екстрактима може бити последица ниже стабилности овог једињења, затим његове брзе конверзије у сулфорафан или његове тенденције да формира коњугате са другим компонентама микробиља (Bello et al., 2018).

Фенолна једињења (ФЈ) идентификована су и квантификована у свим екстрактима испитиваног микробиља. Међутим, детектована фенолна једињења у испитиваним врстама микробиља значајно су се разликовала међу собом (Табела 5.2).

Табела 5.2. Карактеризација и семи-квантификација (mg/100 g СММ) фенолних једињења детектованих у микробиљу броколија, цвекле и амаранта коришћењем UHPLC Q-ToF MS уређаја. За свако детектовано фенолно једињење дато је ретенционо време (**tR**), молекулска формула, израчуната маса, нађена маса и MS фрагменти.

Број једињења	Назив једињења	tR	Молекулска Формула	Израчуната маса	Нађена маса m/z	mDa	MS фрагменти	Узорци (mg/100 g CMM)		
								АМБ	БМБ	ЦМБ
Фенолне киселине и деривати										
1	Хексозид дихидроксибензоеве киселине изомер I ^b	3,83	C ₁₃ H ₁₅ O ₉ ⁻	315,07216	315,07504	-2,88	108,0228 (100) , 109,0298 (41), 110,0330 (4), 152,0132 (58), 153,0199 (19), 154,0198 (2)	10,08	104,14	/
2	Хексозид ванилинске киселине изомер I ^b	4,45	C ₁₄ H ₁₇ O ₉ ⁻	329,08781	329,08943	-1,63	108,021 (100) , 109,0263 (8), 113,0218 (4), 123,0449 (35), 124,0473 (3), 125,0240 (8), 152,0109 (76), 153,0136 (10), 167,0364 (34), 169,019 (3)	4,23	11,25	/
3	Дихексозид хидроксибензоеве киселине ^b	5,18	C ₂₄ H ₁₉ O ₁₀ ⁻	467,09837	467,10054	-2,17	137,0246 (100) , 138,0278 (9), 299,0771 (2), 431,1188 (5)	25,08	/	/
4	Хексозид ванилинске киселине изомер II ^b	5,18	C ₁₄ H ₁₇ O ₉ ⁻	329,08781	329,08927	-1,46	108,0229 (100) , 109,0265 (8), 122,0367 (3), 123,0464 (39), 124,0504 (4), 152,0129 (61), 153,0172 (4), 167,0369 (32), 168,0409 (4)	7,34	38,53	4,41
5	Пентозил хексозид хидроксибензоеве киселине изомер I ^b	5,52	C ₁₈ H ₂₃ O ₁₂ ⁻	431,11950	431,12157	-2,07	137,0246 (100) , 138,0287 (8)	95,15	/	2,58
6	Карбокси- ванилинска киселина ^b	5,59	C ₉ H ₇ O ₆ ⁻	211,02430	211,02751	-3,21	108,0235 (39), 109,0275 (2), 121,0287 (2), 122,0386 (100) , 123,0453 (35), 124,0465 (3)	/	28,99	/
7	Хексозид дихидроксибензоеве киселине изомер II ^b	5,65	C ₁₃ H ₁₅ O ₉ ⁻	315,07216	315,07845	-6,29	108,0222 (8), 109,0305 (100) , 110,0335 (14), 152,0114 (12), 153,0208 (61)	10,33	19,23	3,83
8	Пентозил хексозид ванилинске киселине ^b	5,79	C ₁₉ H ₂₅ O ₁₃ ⁻	461,13007	461,13684	-6,77	108,0226 (5), 123,0448 (8), 152,0113 (18), 153,0166 (2), 167,0356 (100) , 168,0383 (10)	123,40	/	/
9	Синапоил сиригинска киселина ^b	5,92	C ₂₀ H ₁₉ O ₉ ⁻	403,10290	403,10103	1,87	138,0306 (51), 153,0543 (31), 154,0590 (12), 161,0362 (27), 182,0204 (34), 189,0316 (89), 190,0316 (8), 197,0445 (100) ,	/	7,93	/

							198,0494 (13), 203,0441 (7), 204,0558 (15)			
10	Пентозил хексозид дихидроксибензоеве киселине ^b	6,05	C ₁₈ H ₂₃ O ₁₃ ⁻	447,11442	447,11850	-4,08	101,0249 (4), 108,022 (14), 109,0298 (15), 151,0397 (3), 152,0118 (100) , 153,0169 (13), 154,0189 (1), 161,0464 (3), 315,0738 (2), 447,1157 (37)	65,56	/	4,55
11	Пентозид дихидроксибензоеве киселине ^b	6,05	C ₁₂ H ₁₃ O ₈ ⁻	285,06159	285,06344	-1,85	108,0221 (100) , 109,0282 (19), 152,0118 (43), 153,0171 (9)	2,65	/	59,79
12	Хексозид сирингинске киселине ^b	6,32	C ₁₅ H ₁₉ O ₁₀ ⁻	359,09837	359,10153	-3,15	101,0242 (59), 113,0246 (64), 121,0289 (38), 137,0261 (45), 138,0326 (71), 152,0488 (52), 153,0559 (56), 166,0279 (18), 181,0140 (41), 182,0234 (56), 196,0406 (22), 197,0449 (87) , 211,0609 (20), 239,0567 (34), 359,1005 (100)	/	54,42	17,16
13	Пентозид кумаринске киселине ^b	6,32	C ₁₄ H ₁₅ O ₇ ⁻	295,08180	295,08967	-7,87	108,0206 (22), 127,1141 (13), 149,0220 (24), 151,1095 (19), 152,0415 (13), 163,0405 (100)	/	15,80	/
14	Хексозид хидроксибензоеве киселине ^b	6,45	C ₁₃ H ₁₅ O ₈ ⁻	299,07724	299,08261	-5,37	108,0823 (8), 121,024 (11), 122,0373 (61), 123,0458 (51), 137,0252 (100) , 138,027 (10)	9,44	10,02	25,76
15	Дипентозид дихидроксибензоеве киселине ^b	6,66	C ₁₇ H ₂₁ O ₁₂ ⁻	417,10385	417,10765	-3,80	108,022 (18), 109,0298 (23), 110,0326 (1), 151,0402 (4), 152,0121 (100) , 153,0168 (13), 285,0628 (2), 417,1050 (25)	/	/	252,35
16	Хексозид кафеинске киселине ^b	6,66	C ₁₅ H ₁₇ O ₉ ⁻	341,08730	341,09286	-5,56	134,0356 (5), 135,0466 (100) , 136,0467 (9), 137,0575 (11), 145,0860 (5), 161,0255 (6), 164,0495 (6), 178,0266 (3), 179,0352 (61)	/	16,47	/
17	Ферулоилхининска киселина ^b	6,86	C ₁₇ H ₁₉ O ₉ ⁻	367,10290	367,10878	-5,88	111,0471 (4), 117,0343 (15), 120,9974 (9), 134,0387 (100) , 135,0427 (14), 146,0620 (11), 149,0617 (8), 155,0341 (5), 173,0472 (5), 190,0531 (6), 191,0589 (6), 193,0521 (49) , 194,0527 (6)	/	21,67	/

18	Дихексозид синапинске киселине ^b	6,80	C ₂₃ H ₃₁ O ₁₅ ⁻	547,16630	547,17128	-4,98	101,0242 (22), 113,0239 (10), 119,0346 (12), 149,0263 (9), 164,0477 (26), 179,0676 (13), 190,0262 (18), 205,0523 (80), 206,0563 (27), 221,0789 (40), 223,0616 (69), 247,0621 (100)	/	35,71	/
19	Хексозид ферулинске киселине ^b	7,07	C ₁₆ H ₁₉ O ₉ ⁻	355,10346	355,10802	-4,56	111,009 (100) , 112,0128 (7), 132,0233 (6), 134,0375 (85), 135,0408 (8), 149,0616 (20), 154,9994 (12), 160,0170 (73), 161,0204 (8), 175,0402 (59), 176,0450 (8), 178,0277 (44), 179,0308 (5), 193,0514 (28) , 194,0534 (4)	39,70	7,80	/
20	Хексозид синапинске киселине ^{b***}	7,14	C ₁₇ H ₂₁ O ₁₀ ⁻	385,11402	385,11743	-3,41	101,0262(2), 113,0255(2), 119,0222(2), 147,0115(2), 149,0268(4), 164,0499 (10), 175,0056 (12), 190,0296 (100), 191,0334 (13), 192,03511(2), 205,05315 (77) , 206,0571 (13), 207,0594 (2), 223,0633 (3)	/	214,46	/
21	Ферулоил изолимумска киселина ^b	8,14	C ₁₆ H ₁₅ O ₁₀ ⁻	367,06707	367,07166	-4,59	111,0092 (100) , 112,0128 (7), 129,0199 (3), 134,0379 (2), 154,9992 (12), 173,0099 (3)	175,78	/	6,59
22	Синапоил јабучна киселина ^{b***}	8,35	C ₁₅ H ₁₅ O ₉ ⁻	339,07216	339,07690	-4,74	115,0054 (34), 116,0085 (2), 121,0311 (8), 132,0237 (2), 133,0161 (29) , 134,0199 (2), 147,0469 (7), 149,0263 (100) , 150,0297 (10), 164,0499 (79), 165,0532 (9), 193,0168 (2), 208,0406 (3), 223,064 (6)	/	159,12	/
23	Синапинска киселина ^a	8,35	C ₁₁ H ₁₁ O ₅ ⁻	223,06120	223,06408	-2,89	104,0281 (4), 117,0361 (3), 121,0309 (100) , 122,0342 (10), 132,0250 (1), 135,0460 (3), 149,0257 (62), 150,0288 (6), 163,0413 (2), 165,0227 (4), 193,0166 (9)	/	526,06	/
24	Бензоил јабучна киселина ^b	8,48	C ₁₁ H ₉ O ₆ ⁻	237,03990	237,04732	-7,42	103,4469 (3), 115,0112 (3), 121,0295 (100) , 122,0361 (8)	53,27	4,45	/
25	Дисинапоил- дихексозид ^{b***}	8,75	C ₃₄ H ₄₁ O ₁₉ ⁻	753,22420	753,23231	-8,11	119,0359 (3), 164,0496 (4), 179,0659 (3), 190,0294 (7),	/	122,51	/

							205,0529 (100), 206,0565 (14), 208,0398 (3), 223,0637 (66), 224,0672 (8), 247,0642 (9), 265,0760 (4), 289,0751 (3), 529,1625 (42), 530,1661 (14), 531,1661 (3)			
26	Трисинапоил- дихексозид ^{b***}	9,29	C ₄₅ H ₅₁ O ₂₃ ⁻	959,28210	959,28907	-6,97	205,0525 (75), 206,0564 (7), 223,0637 (31), 247,0641 (14), 265,0763 (7), 289,0759 (7), 511,1509 (28), 512,1537 (8), 529,1607 (30), 530,1613 (9), 735,2217 (100), 736,2243 (46), 737,2255 (13), 959,2905 (14)	/	130,53	/
Σ								622,01	1529,09	377,02
<i>Апигенин С-гликозиди****</i>										
27	2''-Хексозил витексин ^c	7,82	C ₂₇ H ₃₁ O ₁₅ ⁺	595,16630	595,17351	-7,21	271,0608 (32), 283,0597 (17), 295,06144 (13), 313,0709 (100), 314,0746 (25), 337,0715 (20), 367,0819 (10), 379,0809 (9), 397,0928 (28), 398,0949 (9), 415,1031 (48), 416,1061 (14), 433,1138 (87), 434,1180 (26), 435,1191 (7)	/	/	65,09
28	2''-Пентозил витексин ^c	7,95	C ₂₆ H ₂₉ O ₁₄ ⁺	565,15570	565,16177	-6,07	283,0599 (16), 295,0603 (6), 313,0714 (100), 314,0753 (24), 337,0711 (16), 343,0821 (7), 367,0818 (14), 379,0818 (11), 397,0923 (42), 398,097 (12), 415,1031 (68), 416,1074 (19), 433,1138 (90), 434,1172 (28), 565,1550 (14)	/	/	87,04
29	2''-Хексозил-6''- малонил витексин ^c	8,22	C ₃₀ H ₃₃ O ₁₈ ⁺	681,16670	681,17274	-6,04	271,0606 (19), 283,0604 (7), 295,0610 (21), 313,0712 (100), 314,0739 (24), 337,0706 (13), 345,1099 (7), 439,1031 (9), 457,1122 (8), 475,1238 (13), 483,0918 (7), 501,1043 (22), 502,1063 (8), 519,1149 (60), 520,1182 (23)	/	/	67,35
30	2''-Хексозил-6''- ацетил витексин ^c *	8,27	C ₂₉ H ₃₁ O ₁₆ ⁻	635,16120	635,16454	-3,34	101,0257 (5), 175,0376 (6), 193,0516 (8), 293,0464 (100),	/	/	6,97

							311,0613 (15), 337,0938 (7), 413,0880(21), 431,0900(5), 455,0981 (88), 473,1113 (12), 575,1456 (9)			
31	2"-Пентозил-6"- малонил витексин ^c	8,36	C ₂₉ H ₃₁ O ₁₇ ⁺	651,15610	651,15914	-3,04	283,0600 (9), 295,0611 (19), 313,0713 (100), 314,0744 (23), 337,0707 (13), 379,0820 (8), 439,1029 (11), 445,1139 (8), 457,1149 (10), 475,1246 (7), 483,0936 (7), 501,1035 (20), 519,1146 (41), 520,1178 (15), 651,1564 (11)	/	/	76,12
32	2"-Хексозил цитозиозид ^c	8,49	C ₂₈ H ₃₃ O ₁₅ ⁺	609,18190	609,18544	-3,54	285,0764 (34), 297,0764 (15), 309,0762 (14), 327,0874 (100), 351,0868 (18), 381,0977 (9), 393,0975 (8), 411,1082 (28), 429,1191 (47), 447,1296 (88)	/	/	170,18
33	2"-Пентозил цитозиозид ^c	8,69	C ₂₇ H ₃₁ O ₁₄ ⁺	579,17140	579,17423	-2,83	297,0767 (15), 327,0872 (100), 328,0908 (25), 351,0863 (15), 357,0970 (9), 381,0975 (14), 393,0975 (10), 411,1088 (41), 412,1115 (13), 429,1193 (70), 430,1223 (23), 447,1296 (94), 448,1334 (31), 579,1716 (18), 580,1764 (7)	/	/	184,04
34	2"-Хексозил-6"- малонил цитозиозид ^{c **}	8,83	C ₃₁ H ₃₅ O ₁₈ ⁺	695,18230	695,18826	-5,96	285,0763 (24), 297,0759 (9), 309,0767 (20), 327,0869 (100), 328,0904 (25), 351,0871 (12), 393,0976 (8), 453,1185 (10), 471,1286 (10), 489,1415 (15), 497,1094 (7), 515,1202 (24), 516,1235 (9), 533,1299 (76), 534,1330 (28)	/	/	64,77
35	2"-Хексозил-6"- ацетил цитозиозид ^c	8,96	C ₃₀ H ₃₅ O ₁₆ ⁺	651,19250	651,19507	-2,57	297,0764 (6), 327,0871 (7), 369,0976 (22), 370,1010 (7), 381,0966 (4), 393,0958 (4), 411,1094 (12), 423,1086 (4), 429,1180 (10), 430,1229 (4), 471,1295 (14), 472,1314 (5), 489,1406 (100), 490,1438 (36), 491,1459 (8)	/	/	194,21

36	2"-Пентозил-6"- ацетил цитозиозид ^c *	9,08	C ₂₉ H ₃₁ O ₁₅ ⁻	619,16684	619,17055	-3,70	101,0255 (18), 113,0246 (26), 131,0344 (12), 283,0643 (12), 307,0619 (100) , 308,0676 (17), 325,0731 (62) , 326,0740 (15), 337,0726 (44), 349,0726 (22), 367,0843 (33), 409,0936 (17), 427,1057 (16), 469,1162 (13), 619,1704 (16)	/	/	35,15
Σ								/	/	950,92
Остали детектовани флавоноиди										
37	Кемпферол-3-О-(6"- хексозил)хексозид- 7-О-хексозид са НСООН ^{c***}	6,53	C ₃₄ H ₄₁ O ₂₃ ⁻	817,20390	817,20689	-2,99	284,0375 (3) , 285,0391 (4), 288,6129 (2), 299,0519 (2), 446,0897 (4), 447,0986 (48) , 448,1022 (16), 489,0970 (3), 609,1533 (100), 610,1576 (39), 611,1627 (9), 612,1502 (2), 771,2062 (5), 772,2040 (3)	/	6,50	/
38	Кемпферол-3-О- синапоил- трихексозид-7-О- хексозид ^{c***}	7,04	C ₅₀ H ₅₉ O ₃₀ ⁻	1139,30910	1139,32320	-14,10	1139,318 (100) , 815,2109 (52), 977,2654 (43) , 609,1536 (9), 284,0357 (8)	/	26,27	/
39	Кемпферол-3-О- синапоил- дихексозид-7-О- хексозид ^{c***}	7,07	C ₄₄ H ₅₁ O ₂₅ ⁺	979,27190	979,27923	-7,33	127,0423 (4), 207,0669 (95) , 208,0701 (16), 225,0765 (4), 287,0564 (55) , 288,0608 (11), 291,0869 (3), 351,1114 (31), 352,1174 (7), 369,1216 (100) , 370,1249 (26), 371,1262 (6), 449,1127 (49)	/	24,84	/
40	Кверцетин 3-О-(6"- рамнозил)- хексозид ^c	8,02	C ₂₇ H ₂₉ O ₁₆ ⁻	609,14611	609,14934	-3,24	151,0039 (3), 178,9985 (4), 255,0319 (3), 271,0253 (7), 300,0283 (100) , 301,0355 (73)	24,37	2,01	3,06
Σ								24,37	59,62	3,06
ΣΣ								646,38	1588,71	1331,01

Скраћенице: „/“ - неидентификована фенолна једињења. **АМБ** - микробиле амаранта; **БМБ** - микробиле броколија; **ЦМБ** - микробиле цвекле. „*“ - једињења која су детектована само у негативном јонизационом режиму; „***“ - једињења која су детектована само у позитивном јонизационом режиму; „****“ - једињења која су претходно детектована у микробилу броколија и пријављена од стране Liu et al. (2022); „*****“ - Апигенин С-гликозиди детектовани у складу са претходно објављеним подацима Isayenkova et al. (2006) и da Silva et al. (2020). Семи-квантитативни подаци једињења изражени помоћу доступних стандарда^a; Количине једињења изражена у еквивалентима синапске киселине^b; Количине једињења изражена у еквивалентима апигенина^c.

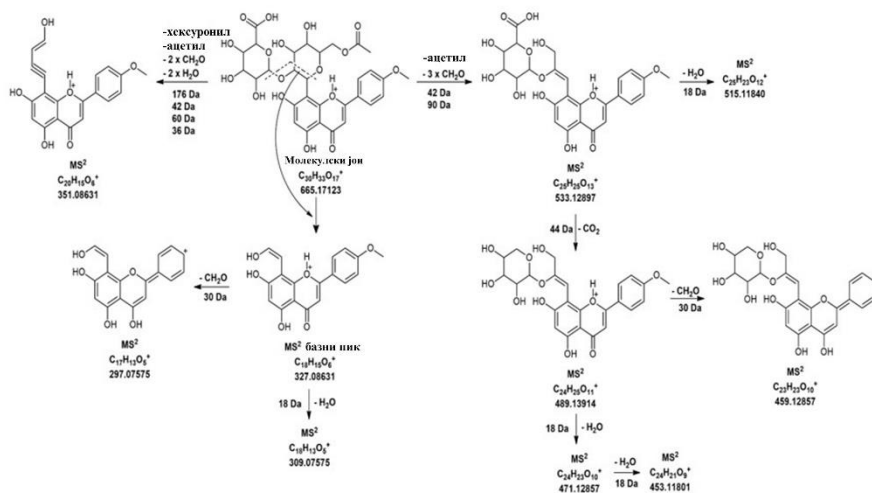
Највећи садржај укупних детектованих фенолних једињења пронађен је у екстрактима микробиља броколија (1588,71 mg/100 g **СММ**), затим у екстрактима цвекле (1331,01 mg/100 g **СММ**), док је најмањи садржај био у микробиљу амаранта (646,38 mg/100 g **СММ**). Висок садржај укупних **ФЈ** у микробиљу броколија и амаранта углавном је резултат високог садржаја деривата фенолних киселина (>95% укупног садржаја **ФЈ**), док је у екстракту микробиља цвекле то последица садржаја апигенин С-гликозида (>70% од укупног садржаја **ФЈ**). Различити деривати хидроксibenзоеве, дихидроксibenзоеве и ванилинске киселине детектовани су у свим анализираним екстрактима микробиља, али је њихов садржај варирао и у великој мери зависио од врсте микробиља. На пример, пентозил хексозид гликозиди хидроксibenзоеве, дихидроксibenзоеве и ванилинске киселине доминантно су били присутни у микробиљу амаранта, заједно са ферулоил изолимуном (175,78 mg/100 g **СММ**) и бензоил јабучном киселином. Са друге стране, дипентозил и пентозил гликозиди дихидроксibenзоеве киселине (252,35 и 59,79 mg/100 g **СММ**) били су најзаступљенији деривати фенолних киселина у микробиљу цвекле. Слично добијеним резултатима у овом истраживању, Wojdyło et al. (2020) су идентификовали фенолне киселине као доминантну класу фенолних једињења у микробиљу амаранта. Поред тога, синапинска киселина (526,06 mg/100 g **СММ**) и њени различити деривати (синапинска киселина хексозид, синапоил јабучна киселина, дисинапоил-дихексозид и трисинапоил-дихексозид) били су доминантна једињења у микробиљу броколија. Идентични синапоил деривати претходно су откривени и о њима су известили Liu et al. (2022) у анализи утицаја различитих метода гајења на производњу микробиља броколија. Неколико апигенин С-гликозида, односно деривати витексина и цитозиозида (3'-метил витексин) (**10 једињења**) је потврђено у микробиљу цвекле, а према досадашњим сазнањима, ова једињења су први пут пријављени у микробиљу цвекле у овом истраживању. Квантификација је потврдила да је укупна количина деривата цитозиозида била значајно већа у поређењу са дериватима витексина, углавном захваљујући једињењима **32** (170,18mg/100 g **СММ**), **33** (184,04 mg/100 g **СММ**) и **35** (194,21 mg/100 g **СММ**) (**Табела 5.2**). Горе поменута једињења имају заједнички фрагмент на 327 *m/z*, што је типичан фрагмент молекула цитозиозида (*m/z* 447), добијен унакрсним „цепанем“ С-везане хексозе. Једињење **35** (*m/z* 651) идентификовано је као 2''-хексозил-6''-ацетил цитозиозид. Кључни MS фрагмент (Y_0^+) за његову идентификацију био је на 489 *m/z* ([М-ацетилни остатак- $^{0.2}X_8$ цепање] $^+$), након чега је уследио фрагмент на 327 *m/z* ([Y_0^+ -хексозилни остатак (162Da)] $^+$). Једињења **32** и **33** препозната су као 2''-хексозил цитозиозид (*m/z* 609) и 2''-пентозил цитозиозид (*m/z* 579), са типичним фрагментом на 447 *m/z*, добијеним губитком О-хексозил (-162 Da) или О-пентозил (-132 Da) остатака. Поред тога, оба једињења су имали фрагмент који је настао губитком молекула воде (18 Da), што показује да су молекули моносахарида повезани интергликозидном 1–2 везом. Типичан MS² фрагмент који се понавља у свим дериватима цитозиозида пронађен је на 351 *m/z*, а његова предложена структура је приказана на **Слици 5.16**. До данас је само неколико истраживања потврдило присуство неколико деривата витексина (једињења **27**, **28**, **29** и **32** у **Табели 5.2**) у зрелој црвеној цвекли (*Beta vulgaris* L.), у њеним стабљикама и листовима (Isayenkova et al., 2006; Lorzola et al., 2018; da Silva et al., 2020). Штавише, горе цитирана истраживања потврдила су и окарактерисала деривате витексина као потенцијално веома корисна једињења за људско здравље, због њихових антиоксидативних, антиканцерогених и антиинфламаторних активности (Ninfali et al., 2017; Lorzola et al., 2018; da Silva et al., 2020). Насупрот томе, апигенин С-гликозид и његови деривати нису пронађени у микробиљу броколија и амаранта. Макромолекул кемпферол (једињење **37**) и кемпферол-синапоил деривати (једињења **38** и **39**) идентификовани су само у микробиљу броколија и чинили су око 4% укупно квантификованих фенолних једињења. Ови деривати кемпферола претходно су

идентификовани од стране Liu et al. (2022) и представљају типична једињења која се налазе у микробиљу и поврћу из фамилије Brassica. Кверцетин 3-*O*-(6''-рамнозил)хексозид је пронађен у све три врсте микробиља (амарант, броколи и цвекла), међутим, највиши садржај овог једињења пронађен је у микробиљу амаранта (24,37 mg/100 g CMM).

(a)



(б)



Слика 5.1. Екстраховани хроматограми (пикови) доминантних деривата цитозиозид и витексина у хладно цеђеном соку од микробиља цвекле, са ретенционим временом и тачном масом (а); предложени фрагментациони пут 2''-хексуронил-6''-ацетил цитозиозид (б)

На основу детаљне анализе беталаина, потврђено је доминантно присуство (изо)амарантина (73,56%) и (изо)бетанина (49,20%) у микробиљу амаранта и цвекле, респективно (Табела 5.3). Остала детектована једињења су декарбокси деривати амарантина и бетанина. Ови деривати беталаина раније су идентификовани и детаљно анализирани у зрелој цвекли (Nemzer et al., 2011; Sawicki et al., 2019) или листовима/изданима различитих врста амаранта (Li et al., 2015). Међутим, колико је познато, ово је прво истраживање које анализира профиле беталаина у микробиљу амаранта и цвекле.

Табела 5.3. Карактеризација и релативни садржај (%) беталаина у микробиљу амаранта и цвекле коришћењем UHPLC Q-ToF-MS уређаја. За свако детектовано једињење дато је ретенционо време (**tR**), молекулска формула, израчуната маса, нађена маса и MS фрагменти.

Број једињења	Назив једињења	tR	Молекулска формула	Израчуната маса	Нађена маса m/z	mDa	MS фрагменти	Узорци (%)		Реф.
								АМБ	ЦМБ	
Беталаини										
41	(Изо)Амарантин	5,05	C ₃₀ H ₃₅ N ₂ O ₁₉ ⁺	727,18285	727,18431	-1,45	150,0552(1), 389,0982 (100) , 390,1014 (28), 391,1044 (5), 551,1509 (5) , 552,1541 (2), 727,1837 (21)	73,56	0,17	(Nemzer et al., 2011; Sawicki et al., 2019; Xie & Chen, 2021)
42	(Изо)Бетанин	5,72	C ₂₄ H ₂₇ N ₂ O ₁₃ ⁺	551,15130	551,15259	-1,29	150,0549 (2), 343,0931 (2), 389,0987 (100) , 390,1021 (29), 391,1041 (5), 551,1522 (4)	5,22	49,20	
43	17-Декарбокси-(изо)амарантин	5,85	C ₂₉ H ₃₅ N ₂ O ₁₇ ⁺	683,19302	683,19430	-1,27	150,056 (1), 345,1084(100) , 346,1116 (27), 347,1135 (4), 507,1618 (9) , 508,1649 (4), 683,1930 (31)	17,35	-	
44	(2, 15 или 17)-Декарбокси-(изо)бетанин	5,93	C ₂₃ H ₂₇ N ₂ O ₁₁ ⁺	507,16150	507,16233	-0,83	106,0660 (2), 150,0549 (2), 299,1035 (1), 301,1186 (1), 345,1089 (100) , 346,1124 (25), 347,1145 (4), 507,1617 (5)	1,66	23,29	
45	(2, 15 или 17)-Декарбокси(изо)бетанин	6,40	C ₂₃ H ₂₇ N ₂ O ₁₁ ⁺	507,16150	507,16406	-2,56	150,0548 (2), 299,1030 (2), 301,1176 (1), 345,1088 (100) , 346,1126 (25), 347,1144 (4), 507,1622 (2)	2,22	23,55	

							100,0392 (27), 106,0643 (37), 132,0449 (53), 144,0302 (47), 150,0541 (99), 151,0626 (62), 152,0708 (36), 202,0881 (34), 209,0726 (36), 227,0862 (35), 253,0849 (61), 255,1138 (65), 281,0767 (49), 299,1034 (43), 345,1061 (100)			
46	(2, 15 или 17)- Декарбокси-(изо) бетанидин	7,01	C ₁₇ H ₁₇ N ₂ O ₆ ⁺	345,10811	345,11267	-4,56		-	3,79	
Укупно (%)								100	100	

Скраћенице: АМБ – микробиље амаранта; ЦМБ – микробиље цвекле.

5.1.2. Физичко-хемијски параметри и принос сокова од микробиља

Резултати за принос и опште физичко-хемијске параметре (сува материја, рН и °Вх) сока од микробиља броколија, цвекле и амарата (БМС, ЦМС и АМС) приказани су у **Табели 5.4**. Принос сокова микробиља добијених поступком хладног цеђења био је веома висок и кретао се од 53,4% (АМС) до 70,2% (БМС). Сви анализирани сокови од микробиља су имали низак садржај суве материје (1,64–2,0%). Поред тога, рН вредности сокова микробиља кретале су се од 5,96 (БМС) до 6,52 (АМС), што је у складу са претходно објављеним резултатима за исте врсте микробиља (Xiao et al., 2015). Вредности укупно растворљивих чврстих материја (°Вх) су сличне за све испитиване сокове од микробиља и кретале су се од 1,8 до 2,0 °Вх. На основу ових резултата, може се закључити да сокови од микробиља имају благу киселост и низак садржај шећера, што их сврстава у нискокалоријска пића.

Табела 5.4. Физичко-хемијски параметри и принос сокова од микробиља броколија, цвекле и амаранта

Сок од микробиља	Фамилија и врста	Принос сока (%)	Проценат суве материје (%)	pH вредност	°Bx
БМС	<i>Brassica oleracea</i> var, <i>italica</i>	70,20±0,15 ^a	1,84±0,05 ^b	5,96±0,01 ^c	2,00±0,01 ^a
ЦМС	<i>Beta vulgaris</i>	62,00±0,10 ^b	2,00±0,01 ^a	6,44±0,01 ^b	2,00±0,01 ^a
АМС	<i>Amaranthus tricolour</i> L,	53,40±0,15 ^c	1,64±0,01 ^c	6,52±0,01 ^a	1,80±0,01 ^b

Скраћенице: АМС - сок од микробиља амаранта; БМС - сок од микробиља броколија; ЦМС - сок од микробиља цвекле. Резултати су изражени као средња вредност ± стандардна девијација. Различита мала слова у истој колони означавају статистички значајну разлику између сокова од микробиља, према **Duncan** тесту, $p < 0,05$.

5.1.3. UHPLC Q-ToF MS профили сокова од микробиља

За разлику од микробиља броколија, ГЛЗ нису детектовани у његовом соку. Током процеса хладног цеђења микробиља долази до механичког оштећења биљног ткива, што резултује ослобађањем ГЛЗ који затим брзо хидролизују у различите изотиоцијанате деловањем ензима мирозиназе (Le et al., 2020). Слично добијеним резултатима у овом истраживању, Bello et al. (2018) су пријавили потпуно одсуство ГЛЗ (глукорафан) у соковима од клица броколија добијених механичким цеђењем сирових и микроталасно третираних клица броколија. Међутим, различити производи деградације глукозинолата (изотиоцијанати) такође показују јаку биолошку активност (Ferruzza et al., 2016; Chartoumpekis et al., 2019; Li et al., 2021; Alloggia et al., 2023) и вероватно доприносе антиоксидативном потенцијалу соку од микробиља броколија (БМС) заједно са фенолним једињењима.

Припремљени сокови од микробиља амаранта, броколија и цвекле (АМС, БМС и ЦМС) имали су висок садржај фенолних једињења, и то 49,82 mg/100 mL, 362,35 mg/100 mL и 342,02 mg/100 mL сока, респективно. Као што је био случај са микробиљем (Табела 5.2), фенолне киселине и њихови деривати су доминантно идентификовани и квантификовани у соку од микробиља броколија (БМС) и амаранта (АМС), док су различити апигенин С-гликозиди углавном пронађени у соку од микробиља цвекле (ЦМС). На основу резултата представљених у Табелама 5.2 и 5.5, разлике међу дериватима фенолних киселина детектованим у микробиљу и њиховим соковима могу се јасно уочити. Ово је вероватно резултат различитог миграња појединих фенолних једињења из биљног ткива у сок или њихове трансформације деловањем различитих ензима током производње сока.

Табела 5.5. Карактеризација и семи-квантификација (mg/100 mL сока) фенолних једињења детектованих у соковима од микробиља амаранта, броколија и цвекле коришћењем UHPLC-QToF-MS уређаја. За свако детектовано фенолно једињење дато је ретенционо време (**tR**), молекулска формула, израчуната маса, нађена маса и MS фрагменти.

Број једињења	Назив једињења	tR	Молекулска формула	Израчуната маса	Нађена маса m/z	mDa	MS фрагменти	Узорци (mg/100 mL)		
								АМС	БМС	ЦМС
Фенолне киселине и деривати										
1a	Хексозид хидроксибензојеве киселине изомер I ^b	1,68	C ₁₃ H ₁₅ O ₈ ⁻	299,07724	299,08054	-3,30	137,0248 (100), 138,0301 (10)	/	3,47	/
2a	Хексозид шикимин хининске киселине ^b	2,15	C ₂₂ H ₂₃ O ₁₅ ⁻	527,10370	527,11099	-7,29	143,0015 (3), 167,0342 (4), 173,0272 (2), 191,0555 (100), 192,0593 (10), 193,0580 (3), 353,0837 (4)	0,92	/	/
3a	Дихидроксибензојева киселина изомер I ^b	2,35	C ₇ H ₅ O ₄ ⁻	153,01933	153,02154	-2,21	108,0229 (100), 109,0294 (81), 110,0311 (6)	/	0,72	/
4a	Дихексозид хидроксибензојеве киселине ^b	3,46	C ₂₄ H ₁₉ O ₁₀ ⁻	467,09837	467,09935	-0,98	137,0255 (100), 138,0284 (9), 299,0774 (2)	2,40	/	/
5a	Хидроксибензојева киселина ^b	3,91	C ₇ H ₅ O ₃ ⁻	137,02390	137,02614	-2,24	/	14,97	5,15	9,81
6a	Дихидроксибензојева киселина изомер III ^b	4,23	C ₇ H ₅ O ₄ ⁻	153,01933	153,02021	-0,88	106,9976 (65), 107,0293 (52), 107,053(20), 108,0218 (100), 122,9839 (14), 123,0203 (34), 135,0194 (11), 135,0538 (12)	/	0,99	/
7a	Пентозил хексозид ванилинске киселине ^b	4,43	C ₁₉ H ₂₅ O ₁₃ ⁻	461,13007	461,13222	-2,16	108,0226 (5), 123,0461(7), 152,0122 (18), 153,0161 (3), 167,0374 (100), 168,0382 (10)	6,86	/	/
8a	Пентозид дихидроксибензојеве киселине ^b	4,71	C ₁₂ H ₁₃ O ₈ ⁻	285,06159	285,06303	-1,44	108,0231 (100), 109,0291 (22), 110,0312 (2), 152,0117 (47), 153,0164 (9), 154,0176 (2)	/	/	7,33
9a	Пентозил хексозид дихидроксибензојеве киселине ^b	5,32	C ₁₈ H ₂₃ O ₁₃ ⁻	447,11390	447,11985	-5,95	101,02230(3), 108,0229 (13), 109,0289 (14), 136,0394 (11), 151,0374 (3), 152,0114 (100), 153,0161 (14), 161,0453 (3), 163,0387 (6), 315,0666 (3),	13,83	/	/

							447,1152 (46)			
10a	Дериват бензоеве киселине (као карбокси бензоева киселина) ^b	5,66	C ₈ H ₅ O ₄ ⁻	165,01880	165,02126	-2,46	105,0153(52), 105,0395 (58), 108,0156 (13), 120,0197(38), 121,0306 (100) , 122,0288 (11), 123,9880 (27), 124,0190(39), 135,0394 (17), 147,8908 (8), 151,9801(24), 152,0114 (32)	/	48,02	/
11a	Хексозид хидроксибензоеве киселине изомер II ^b	5,78	C ₁₃ H ₁₅ O ₈ ⁻	299,07724	299,08174	-4,50	137,0252 (100) , 138,0307 (9)	/	/	1,06
12a	Кумароил- Хининска киселина изомер I ^b	5,78	C ₁₆ H ₁₇ O ₈ ⁻	337,09289	337,09853	-5,64	111,0452 (5), 119,0519 (100) , 120,0542 (11), 163,0406 (50), 164,0437 (7), 173,0448 (4), 191,0564 (60)	/	55,84	/
13a	Бензоева киселина ^b	5,80	C ₇ H ₅ O ₂ ⁻	121,02900	121,03002	-1,02	/	3,68	14,80	0,46
14a	5-О-Кафеоил- хининска киселина изомер I ^b	6,19	C ₁₆ H ₁₇ O ₉ ⁻	353,08781	353,08964	-1,83	135,0452 (1), 161,0242 (2), 173,0454 (1), 191,0554 (100)	/	1,61	/
15a	Хексозид кумаринске киселине ^b	6,27	C ₁₅ H ₁₇ O ₈ ⁻	325,09230	325,09815	-5,85	117,0354 (6), 119,0513 (100) , 120,0544 (11), 163,0398 (24) , 164,0436 (3)	2,63	/	/
16a	Карбокси хидроксибензоева киселина ^b	6,53	C ₈ H ₅ O ₅ ⁻	181,01370	181,01425	-0,55	107,0304(15), 107,0612 (12), 117,0185 (9), 119,0235 (100) , 120,0294 (16), 134,0376(30), 135,0487 (14), 137,0287 (26)	/	0,66	/
17a	Хексозид синапинске киселине ^b	6,59	C ₁₇ H ₂₁ O ₁₀ ⁻	385,11402	385,11652	-2,50	149,0249(21), 164,0481 (56), 165,0516 (8), 175,0042 (12), 179,0701(14), 190,0274 (100) , 191,0325 (25), 205,0510 (99) , 206,0569(45), 207,0492 (9), 217,0156 (11), 221,0806(14), 223,0620 (12)	/	18,15	/
18a	Хексозид ферулинске киселине ^b	6,67	C ₁₆ H ₁₉ O ₉ ⁻	355,10346	355,10148	1,98	111,0102(50), 112,0133 (16), 113,0147 (18), 134,0379 (100) , 135,0424(12), 149,0610 (28), 150,0672 (3), 154,9760 (5), 155,0063 (6), 157,0035 (3), 178,0270 (62),	1,41	/	/

							179,0308 (9), 193,0504 (37) , 194,0542 (6)			
19a	Хидрокси- бензоил јабучна киселина ^b	6,84	C ₁₁ H ₉ O ₇ ⁻	253,03480	253,03892	-4,12	102,9829 (2), 103,0087 (2), 114,0580 (2), 121,0305(100) , 122,0332(10), 123,0058 (2), 123,0383(2), 130,0424 (2)	2,02	/	/
20a	Кумароил- хининска киселина изомер II ^b	6,88	C ₁₆ H ₁₇ O ₈ ⁻	337,09289	337,09441	-1,52	109,0311(2), 111,0446 (18), 112,0467 (2), 119,0508 (44), 120,0531 (5), 137,0257 (11), 138,0320 (1), 155,0348 (6), 163,0402 (26) , 164,0441(4), 173,0455 (100) , 174,0484(10), 191,0549 (3)	/	1,16	/
21a	Синапинска киселина ^a	7,88	C ₁₁ H ₁₁ O ₅ ⁻	223,06120	223,06222	-1,03	105,0352(1), 121,0308 (100) , 122,0339 (9), 134,0359 (1), 135,0456 (13), 136,0548 (1), 148,0172 (5), 149,0248 (50), 150,0277 (5), 163,0396 (13), 164,0469 (5), 165,0197 (27), 166,0219 (3), 193,0142(60), 194,0177 (7)	/	60,00	/
22a	Синапоил јабучна киселина ^b	7,94	C ₁₅ H ₁₅ O ₉ ⁻	339,07216	339,07540	-3,24	115,0047 (47), 116,0085 (2), 117,0301 (1), 121,0313 (8), 132,0226 (2), 133,0156 (43) , 134,0193 (2), 147,0462 (7), 149,0248 (100) , 150,0291 (11), 164,0480 (86), 165,0519 (10), 179,0716 (2), 208,0385 (2), 223,0620 (7)	/	134,18	/
23a	Бензоилјабучна киселина ^b	7,94	C ₁₁ H ₉ O ₆ ⁻	237,03990	237,04514	-5,24	114,9839 (2), 115,0099 (3), 121,0310 (100) , 122,0333 (10)	/	2,09	/
24a	Дихексозид дихидроксибензоєве киселине ^b	8,15 ⁻	C ₂₁ H ₁₉ O ₁₃ ⁻	479,08260	479,08873	-6,13	108,0228(20), 109,0346 (21), 137,0257 (61), 152,0122 (67) , 153,0151(18), 435,0914 (100)	/	8,21	/
25a	Хидроксиферулинска киселина ^b	11,25 ⁻	C ₁₀ H ₉ O ₅ ⁻	209,04500	209,04494	0,06	105,0353 (100) , 107,0146(58), 121,0291 (23), 123,0439 (44), 125,0253 (13), 131,0141 (16), 149,02305	/	2,53	/

							(77), 150,0276(13), 151,0024 (70), 165,0555 (18), 167,0333 (19), 191,0347(10), 193,0143 (63) , 209,0157 (12)			
Σ								48,72	357,58	18,66
<i>Апигенин С-гликозиди</i>										
26a	2''-Хексозил витексин^c	7,54	C ₂₇ H ₃₁ O ₁₅ ⁺	595,16630	595,17146	-5,16	271,0586(29), 283,0586 (17), 295,0580 (13), 313,0710 (100) , 337,0691(18), 367,0794 (10), 379,0794 (8), 397,0905(29), 415,1016 (45), 433,1133 (88)	/	/	28,81
27a	2''-Пентозил витексин^c	7,61	C ₂₆ H ₂₉ O ₁₄ ⁺	565,15570	565,16052	-4,82	283,0596(16), 313,0724 (100) , 337,0699 (17), 343,0802 (9), 367,0806 (16), 379,0806 (11), 397,0921 (41), 415,1041(74), 433,1144 (100)	/	/	34,45
28a	2''-Хексозил-6''-ацетил витексин^c	7,81	C ₂₉ H ₃₃ O ₁₆ ⁺	637,17690	637,18029	-3,39	283,0596(4), 295,0573 (4), 313,0710 (10) , 337,0694 (3), 355,0789 (28), 367,0793 (3), 397,0898 (6), 415,1022 (10), 457,1121 (12), 475,1226 (100)	/	/	4,34
29a	2''-Хексозил-6''-малонил витексин^c	7,95	C ₃₀ H ₃₃ O ₁₈ ⁺	681,16670	681,17004	-3,34	271,0583(18), 283,0590 (8), 295,0587 (21), 313,0712 (100) , 337,0684 (13), 379,0797 (7), 439,1005 (9), 457,1118 (9), 475,1212(14), 483,0908 (8), 501,1012 (23), 519,1140 (60)	/	/	26,43
30a	2''-Хексозил цитозиозид^c	8,29	C ₂₈ H ₃₃ O ₁₅ ⁺	609,18190	609,18759	-5,69	285,0753(32), 297,0745 (16), 309,0745 (13), 327,0844 (100) , 351,0852 (18), 381,0953 (8), 393,0952 (8), 411,1073 (28), 429,1186(50), 447,1272 (91)	/	/	48,94
31a	2''-Рамнозил цитозиозид^c	8,35	C ₂₈ H ₃₃ O ₁₄ ⁺	593,18700	593,19311	-6,11	297,0738(12), 327,0850 (57) , 351,0832 (12), 357,0946 (7), 381,0956 (11), 393,0956 (8), 411,1058 (34), 429,1168 (58),	/	/	5,48

							447,1273 (100)			
32a	2''-Пентозил цитозиозид ^c	8,42	C ₂₇ H ₃₁ O ₁₄ ⁺	579,17140	579,17499	-3,59	297,0746(14), 327,0847 (100), 351,0851 (15), 357,0956 (9), 381,0957 (14), 393,0954 (9), 411,1078 (43), 429,1174(71), 447,1276 (95)	/	/	46,00
33a	2''-Хексозил-6''- малонил цитозиозид ^c	8,56	C ₃₁ H ₃₅ O ₁₈ ⁺	695,18230	695,19050	-8,20	285,0741(24), 297,0736 (9), 309,0747(21), 327,0859 (100), 351,0840 (12), 393,0956 (8), 453,1166 (10), 471,1282 (12), 489,1373 (17), 497,1060 (8), 515,1173 (27), 533,1284 (77)	/	/	17,90
34a	Цитозиозид (3'- Метил витексин) ^c	8,62	C ₂₂ H ₂₃ O ₁₀ ⁺	447,12910	447,13521	-6,11	135,0459 (8), 297,0737 (51), 309,0717 (8), 327,0846 (100), 337,1007 (14), 351,0832(22), 357,0948 (14), 365,1001 (10), 381,0924(11), 393,0937 (15), 411,1024 (31), 429,1197 (16)	/	/	4,71
35a	2''-Хексозил-6''- ацетил цитозиозид ^c	8,69	C ₃₀ H ₃₅ O ₁₆ ⁺	651,19250	651,19531	-2,81	297,0739(3), 309,0738 (3), 327,0852 (8), 351,0839 (2), 369,0966 (27), 393,095(2), 411,1064 (7), 429,1165 (9), 471,1271 (10), 489,1382 (100)	/	/	67,44
36a	2''-Хексуронил-6''- ацетил цитозиозид ^c	8,76	C ₃₀ H ₃₃ O ₁₇ ⁺	665,17180	665,17943	-7,63	297,0742(10), 309,0736 (18), 327,0865 (100), 351,0839 (12), 453,1161(11), 459,1265 (11), 471,1254(12), 489,1366(10), 515,1169 (21), 533,1280 (49)	/	/	18,49
37a	6''-Ацетил цитозиозид ^c	9,30	C ₂₄ H ₂₅ O ₁₁ ⁺	489,13914	489,14587	-6,73	297,0740(33), 309,074 (21), 327,0846 (95), 351,0846 (13), 369,0954 (100), 381,0946(18), 393,0946 (15), 411,1052 (34), 429,1160(45), 471,1267 (16)	/	/	9,39
38a	2''-Малонил-6''- ацетил- цитозиозид ^c	9,57	C ₂₇ H ₂₇ O ₁₄ ⁺	575,14010	575,14610	-6,00	127,0370(7), 129,1006 (7), 297,0701 (12), 309,0736(51), 327,0849 (66), 351,0842 (19), 369,0949 (100), 375,0937 (8),	/	/	1,40

							393,0966 (13), 453,1132(9), 471,1253 (9)			
39a	Апигенин ^a	10,44	C ₁₅ H ₉ O ₅ ⁻	269,04500	269,05007	-5,07	136,9884(53), 139,0059 (53), 141,0708 (26), 143,0506(19), 167,0342 (31), 169,0656 (44), 171,0446(35), 179,0495 (19), 195,0448 (50), 197,0606(25), 223,0392 (52), 241,0492 (43), 251,0359(19), 269,0453 (100)	1,06	/	9,39
Σ								1,06	/	323,17
<i>Остали флавоноиди</i>										
40a	Кемпферол-3-О- синапоил- дихексозид-7-О- хексозид ^c	6,85	C ₄₄ H ₄₉ O ₂₅ ⁻	977,25630	977,26510	-8,80	815,2079 (100), 816,2111(54), 977,2594 (20), 609,1468 (13), 284,0332 (9), 446,085 (3)	/	4,77	/
41a	Халкан-флаван 3-ол димер ^c	7,68	C ₂₇ H ₃₁ O ₁₄ ⁻	579,17140	579,17180	-0,40	116,0382(13), 117,0445 (1), 125,0248 (10), 151,0035 (2), 167,0345 (28), 179,0413 (1), 201,1035 (3), 203,0823 (31), 204,0835 (4), 245,0924(100), 246,0951(19), 247,0961 (2), 271,0607 (4), 289,0706 (47)	/	/	0,19
42a	Еуропетин ^c	9,37	C ₁₆ H ₁₁ O ₈ ⁻	331,04594	331,04602	-0,08	110,0017(37), 111,0082 (6), 121,0299(14), 137,9962(20), 139,0037 (26), 140,0085 (4), 165,9906 (100), 166,9962(24), 181,0143 (11), 193,9856 (6), 243,0284 (5), 271,0239 (8), 287,0173 (5), 316,0210 32), 317,0235 (7)	0,04	/	/
Σ								0,04	4,77	0,19
$\Sigma\Sigma$								49,82	362,35	342,02
<i>Остала детектована једињења</i>										
43a	Туберонска киселина	9,63	C ₁₂ H ₁₇ O ₄ ⁻	225,11270	225,11193	0,77	109,0414(11), 109,0694 (11), 110,0387(100), 111,0439(16), 123,0416 (14), 123,0707 (10), 135,0837(10), 136,0548 (36), 161,0720 (8), 161,1000(9), 163,1125 (21), 179,1085 (8), 181,1220(24), 207,1026 (88),	+	+	-

							208,1046 (13)			
							120,0274(27), 121,0237 (23), 123,1018 (28), 141,8757(21), 142,0382 (32), 142,0750 (25), 143,0676 (100) , 143,1133 (57), 143,1413(26), 151,0361 (38), 168,8724 (26), 205,8271(26), 205,8642 (22), 214,9475 (21)	+	+	+
44a	Метил јасмонат	11,53	C ₁₃ H ₁₉ O ₃ ⁻	223,13340	223,13275	0,65				

Скраћенице: АМС - сок од микробиља амаранта; БМС - сок од микробиља броколија; ЦМС - сок од микробиља цвекле. Садржај једињења квантификован коришћењем доступних стандарда^a; Садржај једињења изражен у еквивалентима синапинске киселине^b; Садржај једињења изражен у еквивалентима апигенина^c. "/" - неидентификована фенолна једињења; "+" - остала детектована једињења.

Поред тога, у соковима од микробиља (Табела 5.5) идентификовано је више фенолних киселина (агликони) и њихових деривата са органским киселинама (хининска киселина и јабучна киселина), вероватно због повећаног контакта између ових молекула и њихове тенденције да ступају у међусобне интеракције. У микробиљу амаранта и његовом соку (АМС) потврђен је висок садржај пентозил хексозид гликозида ванилинске киселине и дихидроксibenзоeве киселине. Међутим, нека једињења која су доминантно детектована у микробиљу амаранта, као што су ферулоил изолимунска киселина, бензоил јабучна киселина и неки гликозиди ванилинске и хидроксibenзоeве киселине, нису детектована у соку од микробиља амаранта. Може се претпоставити да су се ова једињења деградирала или трансформисала током производње сока. То је делимично поткрепљено чињеницом да је висок садржај хидроксibenзоeве (14,97 mg/100 mL) и бензоeве (3,68 mg/100 mL) киселине детектован само у соку од микробиља амаранта (АМС).

Велики број деривата фенолних киселина идентификован је и у соку од микробиља броколија (БМС). Често присутни деривати синапинске киселине (синапинска киселина, синапоил јабучна киселина и синапинска киселина хексозид) детектовани су у великим количинама у микробиљу броколија и у његовом соку (Табеле 5.2 и 5.5). Међутим, карактеристични ди- и трисинапоил гликозиди који су раније детектовани у микробиљу броколија (Liu et al., 2022), нису пронађени у његовом соку (БМС), па се може претпоставити да су ови макромолекули остали у чврстом остатку (тропу) након цеђења микробиља. Поред тога, у соку од микробиља броколија (БМС) такође су детектовани високи садржај хидроксibenзоeве киселине и дихидроксibenзоeве киселине, као и деривати бензоeве киселине, док су њихови гликозидни облици били присутни само у траговима. Вреди напоменути да је кемпферол-3-О-синапоил-дихексозид-7-О-хексозид био једини флавоноид детектован у соку од микробиља броколија (БМС), са садржајем од 4,77 mg/100 mL.

За разлику од АМС и БМС, у соку од микробиља цвекле (ЦМС) откривен је низак садржај деривата фенолне киселине (око 5,5% укупне количине ФЈ). Међу појединачним фенолним киселинама, пентозид дихидроксibenзоeве киселине (слично као и у микробиљу цвекле - ЦМБ) и хидроксibenзоeва киселина била су доминантна једињења у овом соку, са садржајима од 7,33 mg/100 mL и 9,81 mg/100 mL, респективно. Други деривати фенолних киселина пронађени су у малим количинама или у траговима. Интересантно је да дипентозид дихидроксibenзоeве киселине није детектована у соку, док је ово једињење било доминантно присутна у микробиљу цвекле. Може се претпоставити да је ово једињење највероватније заостало у тропу микробиља или трансформисано у друге деривате фенолних киселина током производње сока. Међутим, сок од микробиља цвекле је добар извор неколико кључних апигенин С-гликозида (Табела 5.5), који су добро растворљиви и лако прелазе из микробиља у сок. Укупно је идентификовано 13 деривата витексина и цитозиозида, који чине 94,4% укупне количине фенолних једињења у ЦМС. Такође, деривати цитозиозида били су доминантни, а нарочито 2''-хексозил-6''-ацетил цитозиозид (67,44 mg/100 mL), затим 2''-хексозил цитозиозид (48,94 mg/100 mL) и 2''-пентозил цитозиозид (46,00 mg/100 mL), као и у микробиљу цвекле. Поред тога, 2''-хексуронил-6''-ацетил цитозиозид (једињење 36, Табела 5.5) такође је потврђен (18,49 mg/100 mL), али само у ЦМС. Предложени пут фрагментације за ово једињење је приказан на Слици 5.16. Међу идентификованим дериватима витексина, посебну пажњу треба посветити 2''-хексозил-6''-малонил витексину, 2''-хексозил витексину и 2''-пентозил витексину, чији су појединачни садржаји били виши од 25 mg/100 mL. Неколико студија је већ идентификовало деривате витексина у лишћу зреле цвекле и указало на њихове бројне здравствене предности (Isayenkova et al., 2006; Ninfali et al., 2017; Lorzola et al., 2018; da Silva et al., 2020). Други апигенин С-гликозиди били су присутни у значајно мањим количинама. Екстраховани хроматограми (пикови) доминантних деривата цитозиозида и витексина приказани су на Слици 5.1а. Коначно, ово је прва студија

која даје детаљан профил фенолних једињења у соковима од микробиља броколија, амаранта и цвекле.

Поред фенолних једињења, неколико карактеристичних беталаина идентификовано је у ЦМС и АМС (Табела 5.6). Добра растворљивост беталаина у води доприноси њиховој ефикасној миграцији из биљног ткива у сок. Амарантин и изоамарантин су детектовани у АМС. Насупрот томе, најзаступљенији беталаини у соку од микробиља цвекле (ЦМС) били су бетанин и изобетанин. Слично овим резултатима, Sawicki et al. (2019) известили су о високом укупном садржају беталаина у свежем соку од зреле цвекле, са бетанином као доминантним беталаином. Заједничко за оба сока од микробиља (АМС и ЦМС) било је присуство беталаминске киселине која је идентификована као треће доминантно једињење беталаина. Беталаминска киселина је прекурсор у синтези беталаина, што објашњава њено присуство у оба сока од микробиља. Са друге стране, бетанин може да формира комплексе са ферулинском киселином, што објашњава присуство 6'-О-ферулоил-бетанина у ЦМС. Ово једињење је претходно пронађено у сушеној зрелој цвекли (Nemzer et al., 2011) и другим производима од цвекле (Sawicki et al., 2019). Релативни садржај декарбокси деривата амарантина, бетанина и изобетанина био је низак у оба сока од микробиља (<3% од укупних беталаина). То указује да су беталаини главни носиоци црвене боје у овим хладно цеђеним соковима од амаранта и цвекле. Већи садржај декарбокси деривата беталаина је карактеристичан за термички третиране сокове код којих, насупрот повећању садржаја декарбокси деривата беталаина, долази до смањења беталаина и до промене боје у браон (Celli & Brooks, 2017). Бетаксантини (2 једињења) пронађени су само у соку микробиља цвекле (ЦМС), али је њихов садржај био низак (<4% од укупног садржаја беталаина).

Табела 5.6. Карактеризација и релативни садржај (%) беталаина у соку од микробиља амаранта (АМС) и цвекле (ЦМС) коришћењем UHPLC-QToF-MS уређаја. За свако детектовано једињење дато је ретенционо време (**tR**), молекулска формула, израчуната маса, нађена маса и MS фрагменти.

Број једињења	Назив једињења	tR	Молекулска формула	Израчуната маса	Нађена маса <i>m/z</i>	mDa	MS фрагменти	Узорци (%)		Реф.
								АМС	ЦМС	
Бетацианини и бетаксантини										
45a	Амарантин	2,68	C ₃₀ H ₃₅ N ₂ O ₁₉ ⁺	727,18340	727,18497	-1,57	389,0989 (100), 551,1524 (7)	78,22	-	(Nemzer et al., 2011; Sawicki et al., 2019; Xie & Chen, 2021)
46a	Беталаминска киселина	3,77	C ₉ H ₁₀ NO ₅ ⁺	212,05590	212,05630	-0,40	102,0344 (3), 106,0293 (9), 120,0454 (100), 121,0475 (12), 122,0468 (2), 130,0292 (3), 138,0547 (1), 148,0389 (8), 149,0394 (1), 166,0469 (1)	7,51	8,29	
47a	γ-Аминобутерна киселина-бетаксантин	3,16	C ₁₂ H ₁₅ N ₂ O ₆ ⁺	283,09300	283,09369	-0,69	102,0341(2), 116,0698 (4), 119,0361 (3), 136,0610 (100), 137,0632 (9), 148,0400 (60), 149,0426 (8), 212,0448 (2), 220,0597 (2), 237,0866 (3), 239,0570 (4), 248,0540 (2), 266,0677 (3), 283,0931 (33), 284,0950 (8)	-	0,86	
48a	Изоамарантин	4,91	C ₃₀ H ₃₅ N ₂ O ₁₉ ⁺	727,18340	727,18378	-0,38	389,0985 (100), 551,1515 (6)	8,78	-	
49a	Бетанин	5,11	C ₂₄ H ₂₇ N ₂ O ₁₃ ⁺	551,15130	551,15207	-0,77	150,0540 (2), 343,0909 (2), 345,1058 (1), 389,0978 (100), 390,0990 (32), 391,1026 (6), 551,1503 (5), 552,1520 (2)	3,91	70,54	
50a	Изобетанин	5,59	C ₂₄ H ₂₇ N ₂ O ₁₃ ⁺	551,15130	551,15703	-5,73	150,0531 (2), 343,0895 (1), 389,0959 (100), 390,0999 (25), 391,1010(5), 551,1478	-	7,49	

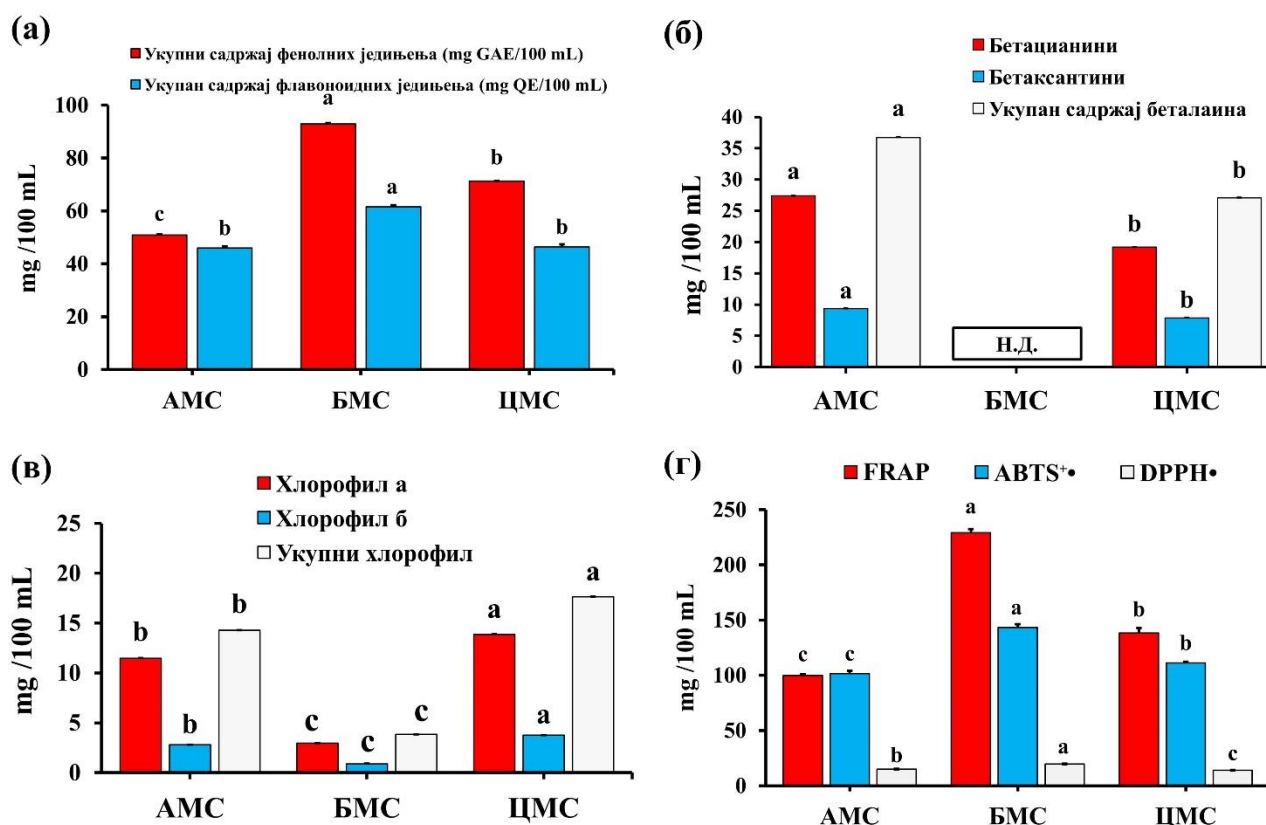
							(4), 552,1526 (2)		
51a	Декарбокси- дехидро- (изо)амарантин	5,86	$C_{29}H_{33}N_2O_{17}^+$	681,17790	681,18521	-7,31	297,0847 (8), 299,0987 (3), 343,0913 (100) , 505,1446 (28)	1,58	-
52a	(2 или 17)- Декарбокси(изо)- бетанин	6,13	$C_{23}H_{27}N_2O_{11}^+$	507,16150	507,16866	-7,16	150,0535 (2), 151,0613 (1), 299,0993 (2), 301,1156 (2), 345,1059 (100) , 346,1116 (27), 347,1114 (4), 507,1575 (3)	-	1,33
53a	(2 или 17)- Декарбокси- необетанин	6,13	$C_{23}H_{25}N_2O_{11}^+$	505,14580	505,15438	-8,58	253,0948 (3), 255,0956 (4), 269,0894 (5), 281,0887 (2), 297,0851 (20), 298,0888 (5), 299,0987 (3), 343,0899 (100) , 344,0943 (24), 345,1067 (49), 346,1086 (8), 505,1434 (10)	-	1,53
54a	Изолеуцин- бетаксантин	6,94	$C_{15}H_{21}N_2O_6^+$	325,14000	325,14250	-2,50	104,0494 (12), 106,0621 (17), 119,0612 (10), 132,0511 (14), 133,0753 (35), 147,0868 (14), 148,0480 (12), 150,0540 (16), 173,0704 (14), 189,1365 (35), 191,081 (100) , 192,0843 (17), 205,1273 (11), 233,1240 (17), 325,1360 (10)	-	2,88
55a	6'-О-Феруонил- бетанин	7,41	$C_{34}H_{35}N_2O_{16}^+$	727,19870	727,20406	-5,36	389,0975 (100)	-	7,07
Укупно (%)								100	100

Скраћенице: АМС - сок од микробиља амаранта и ЦМС - сок од микробиља цвекле.

5.1.4. Укупни садржај фенолних једињења, флавоноида, беталаина и хлорофила у соковима од микробиља

Укупан садржај фенолних једињења и флавоноида у соковима од микробиља одређен је спектрофотометријски и приказан на **Слици 5.2а**. Највиша вредност ТРС добијена је за сок од микробиља броколија (БМС) (92,92 mg GAE/100 mL), а затим следе сокови од цвекле (ЦМС) (71,26 mg GAE/100 mL) и амаранта (АМС) (50,86 mg GAE/100 mL) који прате исти тренд као и резултати хроматографске анализе. Добијени резултати за укупни садржај фенолних једињења у овом раду су у истом опсегу као и резултати које су раније пријавили други аутори за различито обрађене сокове од *Alternanthera sessilis* (Senthilnathan & Muthusamy, 2022) и пшеничне траве (Skoczylas et al., 2018).

Вредности ТФС за сокове од микробиља амаранта, цвекле и броколија биле су редом 45,94; 46,35 и 61,56 mg QE/100 mL. Као што је приказано на **Слици 5.2а**, вредности ТФС за ЦМС и АМС нису биле значајно различите. Ови резултати ТФС не слажу се са резултатима хроматографске анализе која је показала доминантно присуство и садржај флавоноида у ЦМС, нижи садржај у соку од броколија и присуство у траговима у соку од амаранта. Међутим, за тумачење ових резултата треба узети у обзир ограничења спектрофотометријске методе за одређивање ТФС. На крају, добијене варијације у ТФС вредностима могу се објаснити следећим чињеницама: (1) најзаступљенији деривати апигенина у ЦМС не доприносе апсорпцији на 510 nm, и (2) фенолне киселине показују значајну апсорпцију на истој таласној дужини (Pełal & Pyrzyńska, 2014).



Слика 5.2. Укупни садржај фенолних једињења и флавоноида (а), укупни садржај бетацијанина, бетаксантина и укупних беталаина (б), укупан садржај хлорофила а, хлорофила б и укупног хлорофила (в), као и антиоксидативна својства (г) сокова од микробиља. Различита мала слова означавају значајну разлику између сокова микробиља, према Duncan тесту ($p < 0,05$). Скраћенице: „Н.Д.“-нису детектовани.

За привлачну боју микробиља одговорни су различити пигменти. Интензивна боја сокова од микробиља амаранта и цвекле потиче од пигмената беталаина, који не само да

утичу на боју ових врста микробиља, већ и пружају различите здравствене бенефите када се уносе у људски организам. Сок од микробиља амаранта имао је значајно виши ниво укупних беталаина (36,73 mg/100 mL), бетацијанина (27,39 mg/100 mL) и бетаксантина (9,34 mg/100 mL) у поређењу са соком од микробиља цвекле (**Слика 5.2б**). Штавише, на основу добијених резултата, може се закључити да ови хладно цеђени сокови представљају богат извор беталаина. Са друге стране, у оквиру беталаина, бетацијанини су преовлађивали у оба сока (**ЦМС** и **АМС**), скоро три пута више него бетаксантини. Са друге стране, беталаини нису били детектовани у соку од микробиља броколија, што је и било очекивано. Ови резултати су у сагласности са резултатима хроматографске анализе беталаина (**Табела 5.6**).

Са друге стране, зелена боја микробиља потиче од зелених пигмената хлорофила, а нијанса зелене боје биљних узорака често је директно пропорционална количини ових пигмената. Највиши садржај укупног хлорофила (17,63 mg/100 mL), хлорофила а (13,86 mg/100 mL) и хлорофила б (3,77 mg/100 mL) пронађен је у соку од микробиља цвекле, док је најнижи садржај био у соку од микробиља броколија (**Слика 5.2в**). Хлорофили су нестабилни пигменти који при условима ниске рН вредности лако деградирају до феофитина (тамнозелена/браон боја) (Chandra et al., 2021), као што је био случај са соком од микробиља броколија, који је имао најнижу рН вредност, а самим тим и, претпоставља се, највишу стопу конверзије хлорофила.

5.1.5. Антиоксидативна активност сокова од микробиља

Резултати за антиоксидативну активност сокова од микробиља су приказани на **Слици 5.2г**. Сви хладно цеђени сокови од микробиља имају добру способност да неутралишу $ABTS^{+\bullet}$ радикал. Највећу антиоксидативну активност одређену $ABTS^{+\bullet}$ методом имао је узорак сока од микробиља броколија (143,38 mg TE/100 mL), чему је највероватније допринео садржај фенолних једињења и изотиоцијаната. Са друге стране, вредности за антиоксидативност добијене путем DPPH $\bullet$ методе биле су значајно ниже (око 7 пута) у поређењу са вредностима добијеним $ABTS^{+\bullet}$ методом. Хладно цеђени сокови микробиља углавном садрже хидрофилна биоактивна једињења која очигледно имају већи афинитет да интерагују са поларнијим $ABTS^{+\bullet}$ катјонима него са хидрофобним DPPH $\bullet$ радикалима. Слична запажања и резултати саопштени су од стране Skoczylas et al. (2018) који су анализирали антиоксидативну активност на свежем и замрзнутом соку од пшеничне траве.

Сви сокови од микробиља имају високу тенденцију да редукују $[Fe^{3+}-(TPTZ)_2]^{3+}$ комплекс, што указује на њихов добар редукциони капацитет. Највиша FRAP вредност добијена је за **БМС**, затим за **ЦМС** и **АМС**. Корелациона анализа показала је да вредности добијене за антиоксидативну активност сокова од микробиља путем FRAP методе имају снажну позитивну корелацију са вредностима за укупни садржај фенола (TPC) ($r=0,98$), укупни садржај флавоноида (TFC) ($r=0,96$) и укупни садржај фенолних киселина ($r=0,93$).

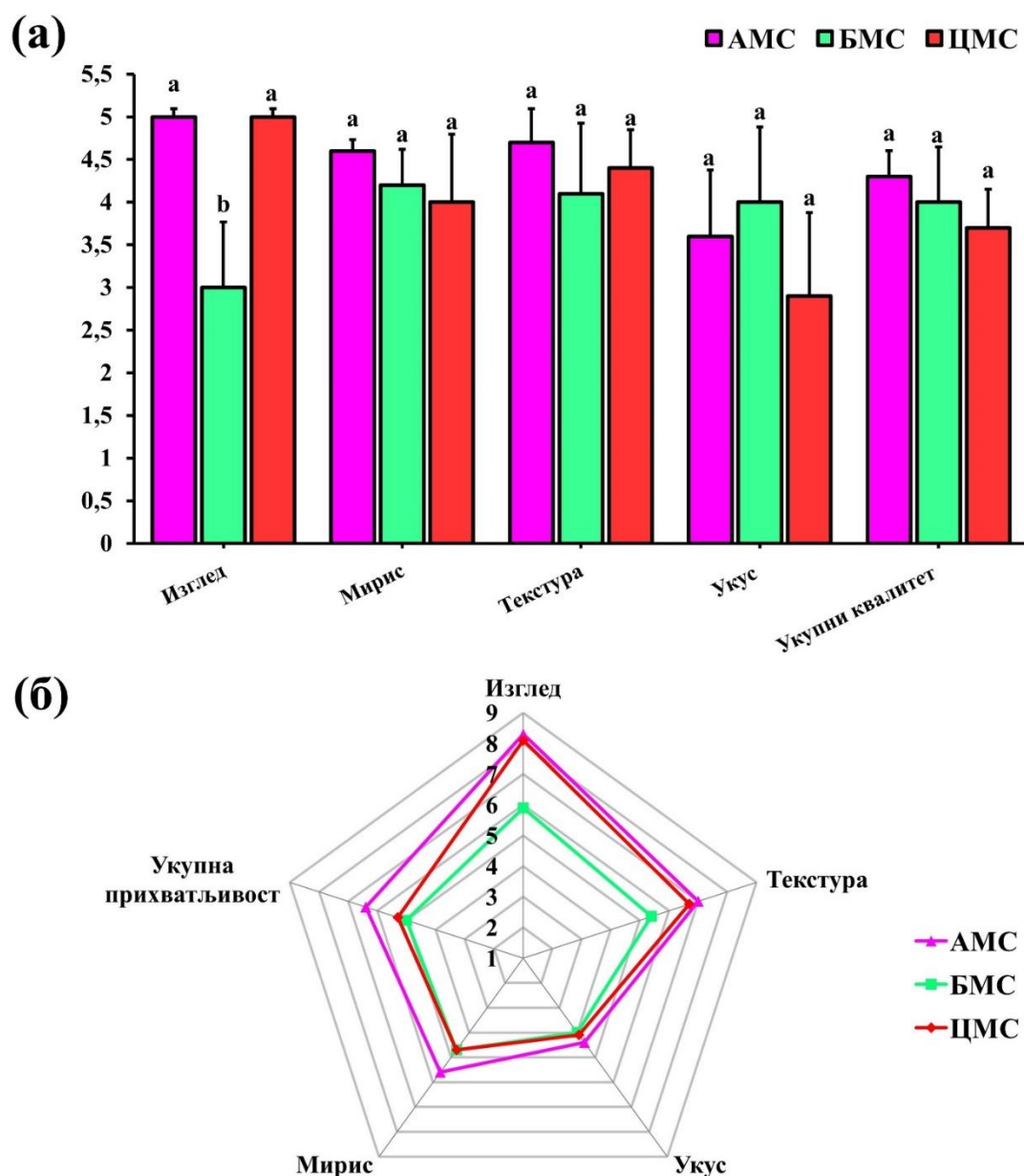
5.1.6. Сензорно испитивање сокова од микробиља

Резултати сензорног испитивања укупног сензорног квалитета сокова од микробиља приказани су на **Слици 5.3а**.

Просечне оцене за мирис, текстуру и укупни сензорни квалитет нису се статистички значајно разликовале између свих сокова од микробиља. Када се посматрају просечне оцене за текстуру, сок од микробиља амаранта имао је највишу оцену за ово сензорно својство због потпуно бистрог изгледа и одсуства колоидних мутноћа у соку. Што се тиче мириса, сви сокови су имали мирисе карактеристичне за врсте микробиља од којих су произведени. Са друге стране, сок од микробиља броколија имао је најнижу просечну оцену за изглед ($p<0,05$) у поређењу са другим соковима. Штавише, на основу коментара оцењивача, ниска оцена за изглед поменутог сока резултат је велике колоидне замућености и брзог таложења честица у соку које су видљиве голим оком. Посматрано из другог угла, сокови од

микробиља амаранта и цвекле добили су високе оцене за изглед због своје светлољубичасте/тамноцрвене боје карактеристичне за ове врсте микробиља. У поређењу са осталим сензорним атрибутима, оцењивачи су дали критике и најниже оцене за укус сокова, рангирајући их од 4,0 (БМС) до 2,9 (ЦМС). Овако ниске оцене за укус нису резултат недостатака у технолошком процесу производње сокова или потенцијалног раста микроорганизама, већ преференције оцењивача према различитим соковима, као и стандарда за сокове од зрих биљака истих врста. Главни недостаци сокова од микробиља амаранта и цвекле били су присуство благе астрингентности (трпкости) и земљаног укуса, док је укус сока од микробиља броколија био типичан за биљке из породице Brassicaceae, са нотама зељастог, травнатог и сумпорног укуса. У сваком случају, оцене за укус нису утицале на финалне оцене, јер су резултати показали да су се просечне оцене за укупан квалитет сокова од микробиља кретале од 3,5 до 4,5, што указује на врло добар сензорни квалитет ових сокова.

Резултати за укупну прихватљивост сокова од микробиља кретали су се од 5,0 (нити ми се свиђа, нити ми се не свиђа) до 6,4 (умерено ми се свиђа) (**Слика 5.36**). Сок од микробиља броколија добио је најнижу оцену за укупну прихватљивост. Слабу прихватљивост овог сока оцењивачи су објаснили у коментарима, наводећи да горак и астрингентан укус сока од микробиља броколија утиче на његову ниску прихватљивост. Укуси сока од микробиља броколија потичу углавном од садржаја биоактивних компоненти као што су феноли и метаболити глукозинолата (изотиоцијанати), а који су доминантно присутни у високим концентрацијама. Са друге стране, оцене за укупну прихватљивост сокова од микробиља имале су позитивну корелацију са резултатима оцена за укус ($r=0,771$) и мирис ($r=0,611$). Ово указује да су ова сензорна својства имала највећи утицај на укупну прихватљивост сокова од микробиља од стране оцењивача/потрошача. Поред тога, на високу укупну прихватљивост утицао је и изглед ових сокова, посебно у случају амаранта, што се може приписати његовој интензивној боји. Слична запажања су изнели и други аутори који су истраживали сензорна својства микробиља броколија, амаранта и цвекле (Xiao et al., 2015; Mitchell et al., 2020).



Слика 5.3. (а) Резултати испитивања укупног сензорног квалитета и (б) укупне сензорне прихватљивости сокова од микробиља броколија, амаранта и цвекле од стране оцењивача/потрошача приказани путем хистограма и радар дијаграма, респективно. Различита мала слова означавају значајну разлику између сокова микробиља, и у оквиру сваког сензорног својства, према Duncan тесту ($p < 0,05$).

5.2. Инкапсулати сокова од микробиља

Микробиље и добијени сокови од микробиља представљају богат извор разноврсних биоактивних компонената, пре свега фенолних једињења (фенолне киселине и апигенин С-гликозиди), затим сумпорних (глукозинолати/изотиоцијанати) и азотних (беталаини/амарантин и бетанин) једињења. Процесом хладног цеђења добијају се сокови/екстракти високог квалитета, и то без примене хемијских екстракционих средстава. Међутим, осетљивост наведених биоактивних компонената, као и њихов губитак током процеса прераде и складиштења, утичу на квалитет и микробиолошку стабилност добијених сокова. На основу свега наведеног, један од циљева ове докторске дисертације била је инкапсулација хладно цеђених сокова од микробиља одабраних биљних врста у циљу очувања биоактивних компонената и њиховог продужења рока трајања. Стога, ови сокови су представљали прикладну сировину за процес инкапсулације техником спреј сушења, а као носачи за биоактивне компоненте коришћени су малтодекстрин и инулин. Поред производње инкапсулата од сокова микробиља броколија, цвекле и амаранта, циљ дисертације била је и њихова карактеризација у погледу биоактивних компонената, морфологије и физичко-хемијских својстава.

5.2.1. Физичко-хемијска карактеризација инкапсулата

Физичко-хемијска својства спреј осушених инкапсулираних сокова од микробиља амаранта, цвекле и броколија унутар малтодекстрина и инулина (инкапсулати), као и контролних узорка без носача, приказана су у **Табели 5.7**.

Принос инкапсулације је најважнији параметар за процес инкапсулације, који притом има велики утицај на избор технике инкапсулације. Висок принос инкапсулата добијених спреј сушењем једна је од главних предности ове технике (Piñón-Balderrama et al., 2020), што уједно доприноси и ниској крајњој цени производа. На основу података из литературе, показатељ успешног спреј сушења јесте принос већи од 50% (Tontul & Toruz, 2017), што је потврђено за све инкапсулате сокова од микробиља, при чему су се вредности кретале од 75,96–82,79% за спреј осушене инкапсулиране сокове од микробиља унутар малтодекстрина и 60,54–72,38% за оне инкапсулиране унутар инулина (**Табела 5.7**). Даље, највећи принос инкапсулата је био за **БМД** инкапсулате (82,79%). Присуство већег садржаја носача у односу на активну компоненту у напојној смеси резултира вишом температуром преласка у стакласто стање, што уједно доприноси и повећању приноса инкапсулата у односу на контролне узорке (Tontul & Toruz, 2017).

Генерално, сокови од микробиља инкапсулирани унутар малтодекстрина имали су значајно већи принос у односу на оне инкапсулиране инулином, вероватно због утицаја примењених носача и њихове различите температуре стакластог прелаза (Tontul & Toruz, 2017; Araujo-Díaz et al., 2017). Даље, инкапсулати сокова микробиља у оквиру истих носача су такође показали различите приносе. Процесни параметри спреј сушења укључујући задати проток раствора, распршивање, улазну и излазну температуру, такође могу допринети приносу инкапсулације (Tontul & Toruz, 2017). Примењени проток раствора и распршивање могу утицати на величину капљица, при чему у случају већих капљица долази до негативног утицаја преноса топлоте и масе, резултујући капањем и/или лепљењем за зидове коморе спреј сушача (Tonon et al., 2008; Largo Avila et al., 2015), што утиче на смањење приноса. Са друге стране, контролни узорци имали су ниже вредности за принос у поређењу са инкапсулатима. Принос контролних узорка се кретао од 22,76% (**АК**) до 46,18% (**БК**). Поред ниског приноса, спреј осушени сокови од микробиља без употребе носача су показали негативне особине као што су лепљивост и повећана хигроскопност, што се приписује одсуству носача (Tonon et al., 2008; Fazaeli et al., 2012). У одсуству носача, густина и вискозност напојне смеше која садржи сок од микробиља су ниске, па након распршивања настају ситне капљице које великом брзином ударају о површину зидова коморе спреј

сушача и брже се суше. Ниска температура стакластог прелаза и висока хигроскопност ових контролних узорак доводе до њихове повећане лепљивости, што је потврђено и у другим истраживањима (Goula & Adamopoulos, 2010). Из горенаведених разлога, спреј осушени сокови од микробила без носача били су економски неоправдани за даљу употребу, али су коришћени искључиво као контролни узорци у даљем истраживању ради поређења са инкапсулатима.

Резултати за ефикасност инкапсулације добијених инкапсулата су приказани у **Табели 5.7**. Као што се може видети, највишу вредност за ефикасност инкапсулације је имао ЦМД (85,71%), а најнижу АИН (70,42%). Ови резултати указују да спреј сушење представља обећавајућу технику за инкапсулацију сокова од микробила у оквиру различитих угљенохидратних носача (малтодекстрин и инулин). Спреј осушени инкапсулирани сокови од микробила унутар малтодекстрина показали су вишу ефикасност инкапсулације него они унутар инулина, што указује на то да врста носача има велики утицај на ефикасност инкапсулације. Друга истраживања су известила слична запажања о ефикасности инкапсулације коришћењем сличног биљног материјала (Robert et al., 2015; Akbas et al., 2017; Flores-Mancha et al., 2020; Ortega-Hernández et al., 2023), док је висока ефикасност инкапсулације такође потврђена у претходним студијама које су користиле спреј сушење за инкапсулацију сокова од лишћа и корена рена (Marković et al., 2024; Marković et al., 2025), као и екстракта цвекле (Tumbas Šaronjac et al., 2016), уз примену различитих носача на бази угљених хидрата. Поменута висока ефикасност инкапсулације може се објаснити процесом инкапсулације у којем долази до формирања танког слоја носача око честица, пружајући добре заштитне особине добијеним инкапсулатима (Mousavi Kalajahi & Ghandiha, 2022). Различита ефикасност инкапсулације између добијених инкапсулата може бити резултат присуства различитих биоактивних компонената у соковима микробила који су коришћени као сировине за процес инкапсулације. Даље, разлика у вредностима ефикасности инкапсулације добијених инкапсулата може бити и последица коришћених носача и њихове способности да задрже фенолна једињења унутар полимерних матрикса, као и очигледна разлика у саставу сокова микробила. Ово се додатно може потврдити чињеницом да су најзаступљенија фенолна једињења у соковима од микробила броколија и амаранта фенолне киселине, док су у соку од микробила цвекле то били флавоноиди (апигенин С-гликозиди) (**Табела 5.5**). Поред тога, важно је напоменути да су фенолне киселине осетљивије на сушење при високим температурама од флавоноида (Tumbas Šaronjac et al., 2016).

Садржај влаге у инкапсулатима је приказан у **Табели 5.7**. Као што се може уочити, контролни узорци су имали виши садржај влаге у поређењу са инкапсулатима ($p < 0,05$). Добијене вредности за садржај влаге су се кретале од 5,09% (БМД) до 12,27% (БК). Виши садржај влаге у контролним узорцима може утицати на њихово слеplивање током манипулације и складиштења. Са друге стране, сви инкапсулати су показали низак садржај влаге ($< 9\%$), нарочито инкапсулати са малтодекстрином, па се могу класификовати као микробиолошки безбедни са потенцијално дугим роком трајања (Akbas et al., 2017; Tontul & Toruz, 2017; Thakur et al., 2019). Спреј осушени инкапсулирани сокови од микробила унутар инулина имали су значајно виши садржај воде у поређењу са онима на бази малтодекстрина. Ова појава се може приписати различитим молекулским масама полимера коришћених као носач за процес инкапсулације, при чему је инулин полимер веће молекулске масе, са високом хигроскопношћу и може променити своју микроструктуру и изгубити својства праха када се нађе у окружењу са високом влажношћу (Toneli et al., 2007). Даље, ове разлике могу бити повезане и са већом хигроскопношћу инулина, будући да услед његове разгранате хемијске структуре (јединице фруктозе) долази до олакшаног водоничног везивања и задржавања воде у његовој структури. Поред тога, садржај влаге у инкапсулатима може зависити и од температуре ваздуха за сушење. С тим у вези, пожељно је оптимизовати операционе параметре спреј сушења како би се избегло добијање инкапсулата са високим садржајем влаге који имају тенденцију агрегације (Machado et al., 2022). Ипак, садржај

влаге испод 10% је прихватљива вредност (Akbas et al., 2017; Thakur et al., 2019), што је у складу са добијеним резултатима за садржај влаге у инкапсулатима.

Табела 5.7. Физичко-хемијска својства спреј осушених инкапсулираних сокова од микробиља унутар малтодекстрина и инулина, као и контролних узорака без носача

Узорак	Принос (%)	Ефикасност инкапсулације (%)	Садржај влаге (%)	Насипна густина (g/mL)	Тапкана густина (g/mL)	CI (%)	HR
АК	22,76±1,40 ^h	/	11,73±0,80 ^a	0,17±0,02 ^g	0,32±0,01 ^f	47,33±4,62 ^a	1,91±0,16 ^a
АМД	78,05±0,44 ^b	83,55±2,08 ^b	6,62±0,21 ^e	0,40±0,01 ^c	0,60±0,01 ^e	34,21±1,00 ^{bc}	1,52±0,02 ^b
АИН	61,55±0,36 ^e	70,42±0,84 ^d	7,76±0,24 ^{cd}	0,52±0,01 ^b	0,78±0,02 ^c	33,63±0,51 ^{bc}	1,51±0,01 ^b
ЦК	26,79±1,02 ^g	/	10,46±0,80 ^b	0,19±0,01 ^f	0,31±0,02 ^f	36,45±6,08 ^{bc}	1,58±0,15 ^b
ЦМД	75,96±0,13 ^c	85,71±0,92 ^a	6,61±0,08 ^e	0,41±0,01 ^c	0,64±0,01 ^d	36,05±0,66 ^{bc}	1,56±0,02 ^b
ЦИН	60,54±0,17 ^e	79,49±0,39 ^c	7,31±0,31 ^{de}	0,56±0,01 ^a	0,87±0,01 ^a	35,50±1,05 ^{bc}	1,55±0,03 ^b
БК	46,18±1,79 ^f	/	12,27±0,15 ^a	0,26±0,01 ^e	0,32±0,01 ^f	18,01±0,64 ^d	1,22±0,01 ^c
БМД	82,79±0,33 ^a	82,19±0,26 ^b	5,09±0,15 ^f	0,41±0,01 ^c	0,60±0,01 ^e	31,47±2,23 ^c	1,46±0,05 ^b
БИН	72,38±0,21 ^d	79,07±0,22 ^c	8,29±0,09 ^c	0,52±0,02 ^b	0,83±0,01 ^b	37,89±1,82 ^b	1,61±0,05 ^b

Различита мала слова у истој колони означавају статистички значајне разлике између узорака, према **Duncan** тесту, $p < 0,05$.

Насипна и тапкана густина су важни параметри за предвиђање понашања прашкастих узорака током паковања, складиштења и транспорта. Висока вредност насипне густине прахова резултира ефикаснијим паковањем, док ниска насипна густина повећава контакт са ваздухом унутар прахова и подстиче њихову оксидацију (Lourenço et al., 2020). Резултати за тапкану и насипну густину инкапсулата показали су више вредности у поређењу са контролом, што указује на боља складишна својства и потенцијално спречавање реакција оксидације (Carneiro et al., 2013). Резултати указују и на јаку позитивну корелацију између насипне и тапкане густине ($r=0,981$).

Што се тиче поређења инкапсулата у погледу насипне и тапкане густине, резултати су се кретали од 0,40 (АМД) до 0,56 g/mL (ЦИН) и од 0,60 (БМД и АМД) до 0,87 g/mL (ЦИН), респективно. Највише вредности насипне (0,56 g/mL) и тапкане густине (0,87 g/mL) пронађене су за **ЦИН**, док су најниже вредности пронађене код **АМД** (0,40 и 0,60 mg/L, респективно). Ови резултати су у складу са истраживањем Yousefi et al. (2022), који су спровели оптимизацију инкапсулације екстракта цвекле коришћењем 20%-ог малтодекстрина као носача. Као што је раније речено, насипна густина зависи од неколико фактора, као што су величина и расподела честица, хемијски састав, садржај влаге, почетна својства раствора за напајање, време сушења и температуре (Yousefi et al., 2022). Ово истраживање је показало да су спреј осушени инкапсулирани сокови од микробиља унутар инулина имали значајно више вредности насипне и тапкане густине у поређењу са оним унутар малтодекстрина ($p < 0,05$). Слична запажања су изнели и Michalska-Ciechanowska et al. (2020), који су пријавили више вредности насипне густине за инкапсулирани сок од бруснице са инулином него са малтодекстрином. Ови резултати су у складу са чињеницом да је насипна густина уско повезана са молекулском масом носача (Yousefi et al., 2022).

Постојала је снажна позитивна корелација између вредности за насипну и тапкану густину и садржаја влаге у инкапсулатима ($r > 0,7$). На основу резултата тапкане и насипне густине, израчунати су индекс компресибилности и Хауснеров однос (HR) како би се одредила проточност и кохезивност инкапсулата. Према класификацији (видети **Табелу П2**), контролни узорци су међусобно показали различите вредности за ове параметре, као и у односу на инкапсулате. Спреј осушени сок од микробиља броколија без присуства носача показао је ниже вредности проточности и кохезивности у поређењу са инкапсулатима **БМД** и **БИН**, док су спреј осушени сокови од микробиља амаранта и цвекле показали више вредности за исте параметре од њихових инкапсулата (**ЦМД**, **ЦИН**, **АМД** и **АИН**). Разлике између узорака могу бити због различитог садржаја влаге и састава сокова од микробиља. На

проточност узорака може утицати и величина честица. Узимајући ову тврдњу у обзир, контролни узорак (**БК**) је имао највећу величину честица са тенденцијом ка агрегацији (видети **Слике 5.3 и 5.4**) и већи садржај воде него инкапсулати (**БМД** и **БИН**), што је резултовало смањењем проточности и формирањем течних мостова, док мала величина честица прахова доводи до ниже проточности (Shenoy et al., 2015; Suhag et al., 2024). Међу инкапсулатима, **БМД** (31,47), **АМД** (34,21) и **АИН** (33,63) су показали задовољавајућу проточност, док су други инкапсулати показали лошу проточност (**Табела 5.7**). Што се тиче кохезивности, сви инкапсулати су имали високе вредности HR и показали високу кохезивност. Најниже вредности проточности (31,47) и кохезивности (1,46) добијене су за **БМД**. Узимајући у обзир добијене резултате, може се закључити да су малтодекстрин и инулин погодни носачи за сокове од микробиља применом спреј сушења у циљу смањења згрушавања и лепљивости инкапсулата и побољшања проточности и стабилности при складиштењу.

5.2.2. Боја инкапсулата

Боја спреј осушених и инкапсулираних сокова од микробиља представља важан параметар квалитета, нарочито за оне прахове који ће се потенцијално користити за бојење хране. Добијени прахови од сокова микробиља броколија, амаранта и цвекле имали су боју типичну за врсте микробиља коришћених за инкапсулацију у овој дисертацији, са очигледним визуелним разликама. Узимајући у обзир ову чињеницу, резултати за параметре боје контроле и инкапсулата интерпретирани су посебно за сваки инкапсулирани сок. Слике контролних узорака и добијених инкапсулата су приказане на **Слици 5.4**.



Слика 5.4. Слике контролних узорака и инкапсулата добијених спреј сушењем

Резултати добијени за параметре боје спреј осушених инкапсулираних сокова од микробиља унутар малтодекстрина или инулина (инкапсулата), као и за контролне узорке без носача, приказани су у **Табели 5.8**.

Табела 5.8. Параметри боје (L^* , a^* , b^* , h° и C^*) спреј осушених инкапсулираних сокова од микробиља унутар малтодекстрина или инулина, као и за контролне узорке без носача.

Узорак	Параметри боје				
	L^*	a^*	b^*	h°	C^*
АК	43,47±0,71 ^g	20,80±0,08 ^a	0,74±0,01 ^g	0,04±0,00 ^h	20,81±0,08 ^b
АМД	62,06±0,85 ^c	20,73±0,05 ^a	-1,56±0,07 ⁱ	359,93±0,01 ^a	20,79±0,06 ^b
АИН	57,65±0,20 ^e	17,82±0,19 ^b	0,40±0,05 ^h	0,02±0,00 ⁱ	17,83±0,20 ^c
ЦК	42,89±0,10 ^h	12,36±0,10 ^c	6,97±0,05 ^e	0,51±0,00 ^f	14,19±0,11 ^e
ЦМД	59,99±0,10 ^d	12,35±0,07 ^c	6,05±0,03 ^f	0,46±0,01 ^g	13,75±0,07 ^f
ЦИН	56,00±0,03 ^f	9,94±0,06 ^d	7,58±0,05 ^d	0,65±0,00 ^e	12,50±0,08 ^g
БК	56,29±0,22 ^f	-1,21±0,03 ^e	23,55±0,18 ^a	178,48±0,00 ^d	23,58±0,18 ^a
БМД	83,88±0,08 ^a	-4,47±0,03 ^f	10,78±0,44 ^c	178,82±0,01 ^b	11,67±0,40 ^h
БИН	80,95±0,03 ^b	-5,56±0,02 ^e	14,31±0,04 ^b	178,80±0,00 ^c	15,35±0,04 ^d

Различита мала слова у истој колони означавају статистички значајне разлике између узорака, према Duncan тесту, $p < 0,05$.

Сви инкапсулати су показали значајно веће L^* вредности и ниже C^* вредности у поређењу са одговарајућим контролним узорцима, указујући на светлију и благо интензивнију боју инкапсулата. Ово је типична појава за инкапсулате због утицаја коришћених носача. Инулин и малтодекстрин се обично додају у форми праха у процесу хомогенизације са активном компонентом, при чему због своје изразито беле боје доприносе повећању осветљености (повећање L^* вредности) инкапсулата (Caliskan & Dirim, 2016). Са друге стране, техника спреј сушења подразумева примену високе температуре током кратком времена, при чему је напојна смеша изложена високој температури у комори спреј сушача. Овај поступак може узроковати реакцију потамњивања, која је вероватно заслужна за промену боје и осветљења контролних прахова у поређењу са инкапсулатима (Caliskan & Dirim, 2016; Tontul & Topuz, 2017).

Спреј осушени инкапсулирани сокови од исте врсте микробиља унутар малтодекстрина или инулина су такође показали разлике у боји, вероватно због структурних карактеристика примењених носача и њихове способности да задрже и манифестују боју која потиче од сокова микробиља. Инкапсулати са малтодекстрином су генерално имали веће L^* вредности у поређењу са инкапсулатима унутар инулина. Са друге стране, C^* вредности биле су веће у АМД и ЦМД инкапсулатима, али ниже у БМД, што очигледно зависи од боје сока коришћеног за инкапсулацију. БМД (83,88) је показао највишу L^* вредност због специфичне зелене боје која је својствена биљкама из породице Brassicaceae. Као што је и очекивано, БМД и БИН су показали негативне a^* вредности које одговарају зеленој боји, док су остали инкапсулати имали позитивне a^* вредности које одговарају црвеној боји њихових сокова, односно присутних бетацијана (Chranioti et al., 2015). Међу инкапсулатима се могу уочити значајне разлике ($p < 0,05$) у вредностима L^* , a^* и b^* . Коришћење малтодекстрина као носача даје веће L^* и a^* вредности, као и мање b^* вредности у поређењу са инулином. Сличне резултате и тренд у параметрима боје су претходно објавили Michalska-Ciechanowska et al. (2020), за спреј осушен инкапсулиран сок од бруснице унутар малтодекстрина/инулина. C^* вредности су показале сличан тренд као и a^* вредности за инкапсулате (ЦМД, ЦИН, АМД и АИН) и b^* вредности за остале инкапсулате (БМД и БИН). Такође, zasiћеност (C^*) инкапсулата зависи и од носача који се користи за инкапсулацију. Малтодекстрин као носач за црвено обојене биљке имао је високу zasiћеност у поређењу са другим носачима, како је претходно наведено у истраживању Todorović et al. (2022). Инкапсулати добијени из сокова од микробиља из породице Amarantaceae (ЦМД, ЦИН, АМД и АИН) имали су ниске вредности h° које указују на црвену боју.

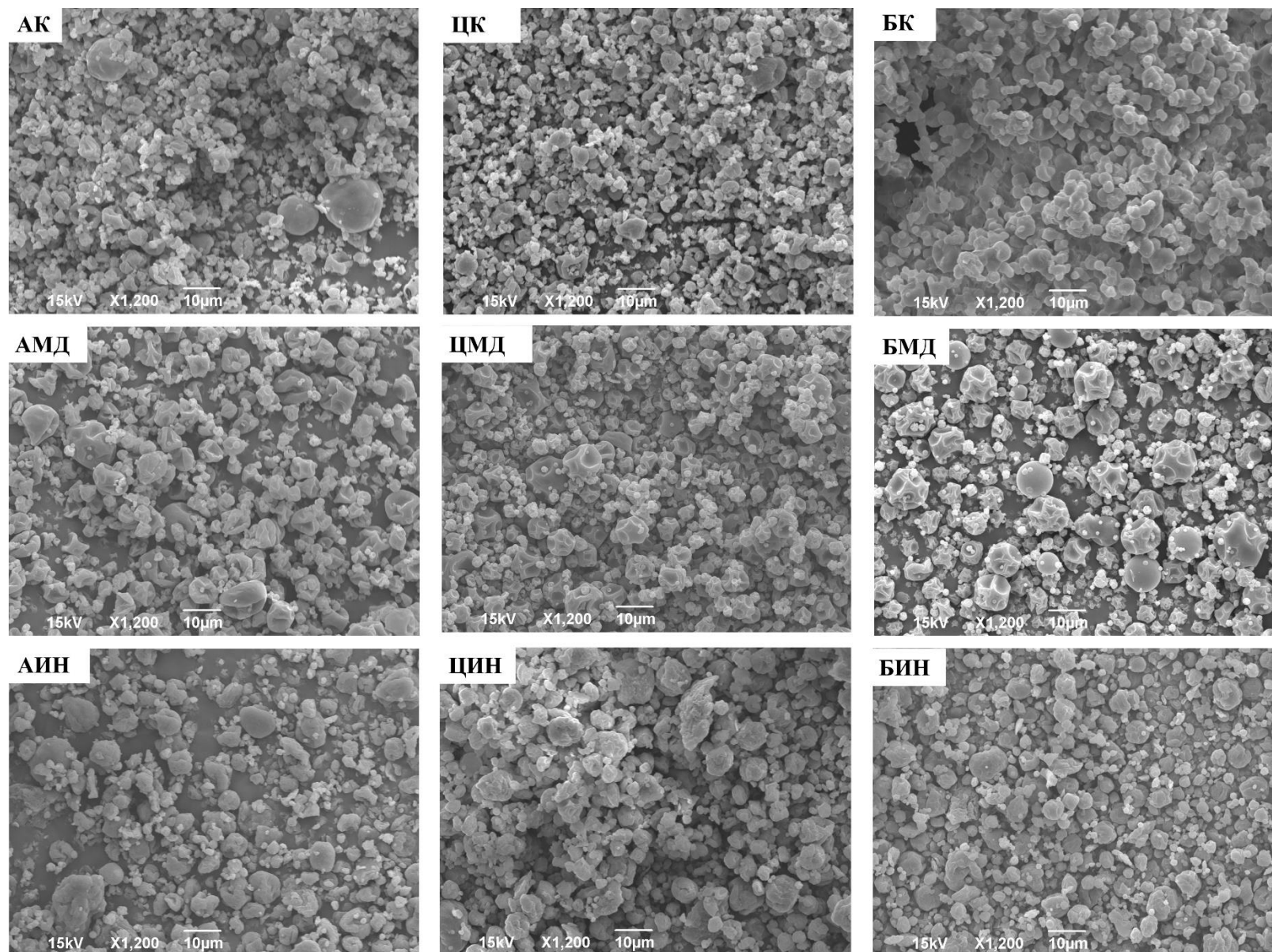
5.2.3. Морфолошке карактеристике инкапсулата

Скенирајући електронски микроскоп (SEM) је коришћен за процену морфолошких карактеристика контролних и инкапсулираних узорака (Слика 5.5), док се величина њихових честица и расподела величина честица може видети на Слици 5.6. Пре свега, треба

напоменути да код свих узорака постоји значајно одступање од нормалне расподеле величине честица.

Као што се може приметити на **Слици 5.5**, контролни узорак (**БК**) је имао приметно велики број малих честица неправилног облика, без јасне међусобне раздвојености честица, тј. честице су биле спојене у виду агрегата. Ова појава се може приписати приметној лепљивости честица, што представља једну од непожељних карактеристика осушених производа (у овом случају контролних узорака). Штавише, сви контролни узорци имали су неправилну микроструктуру, са честицама у форми агрегата. Лепљивост је непожељна карактеристика прахова која изазива проблеме приликом манипулације, мешања, обраде и складиштења прахова (Rahman, 2020). У одсуству носача, присуство органских киселина и шећера из сокова микробиља значајно подстиче лепљивост прахова (Srivastava et al., 2022). Узимајући у обзир сва горенаведена ограничења контролних узорака, употреба носача у процесу инкапсулације сокова од микробиља техником спреј сушења је пожељна, а у неким случајевима и неопходна за редукцију лепљивости и побољшање техно-функционалних својстава (Коџ & Dirim, 2018). Штавише, добро је познато да инкапсулација техником спреј сушења користи носаче који имају кључну улогу у редукцији и контроли лепљивости, хигроскопности и термичкој разградњи биоактивних једињења осетљивих на топлоту (Srivastava et al., 2022).

Као што се може видети на **Слици 5.5**, инкапсулати са малтодекстрином имали су раздвојене честице са смањеном агрегацијом и мањом лепљивошћу инкапсулата у поређењу са контролним узорцима. Нижа лепљивост довела је и до већег приноса инкапсулата због мањег заостатка у комори за сушење, као што је претходно показано (видети **Табелу 5.7**), што може утицати на смањење деградације биоактивних компоненти током времена (Gawałek, 2021).

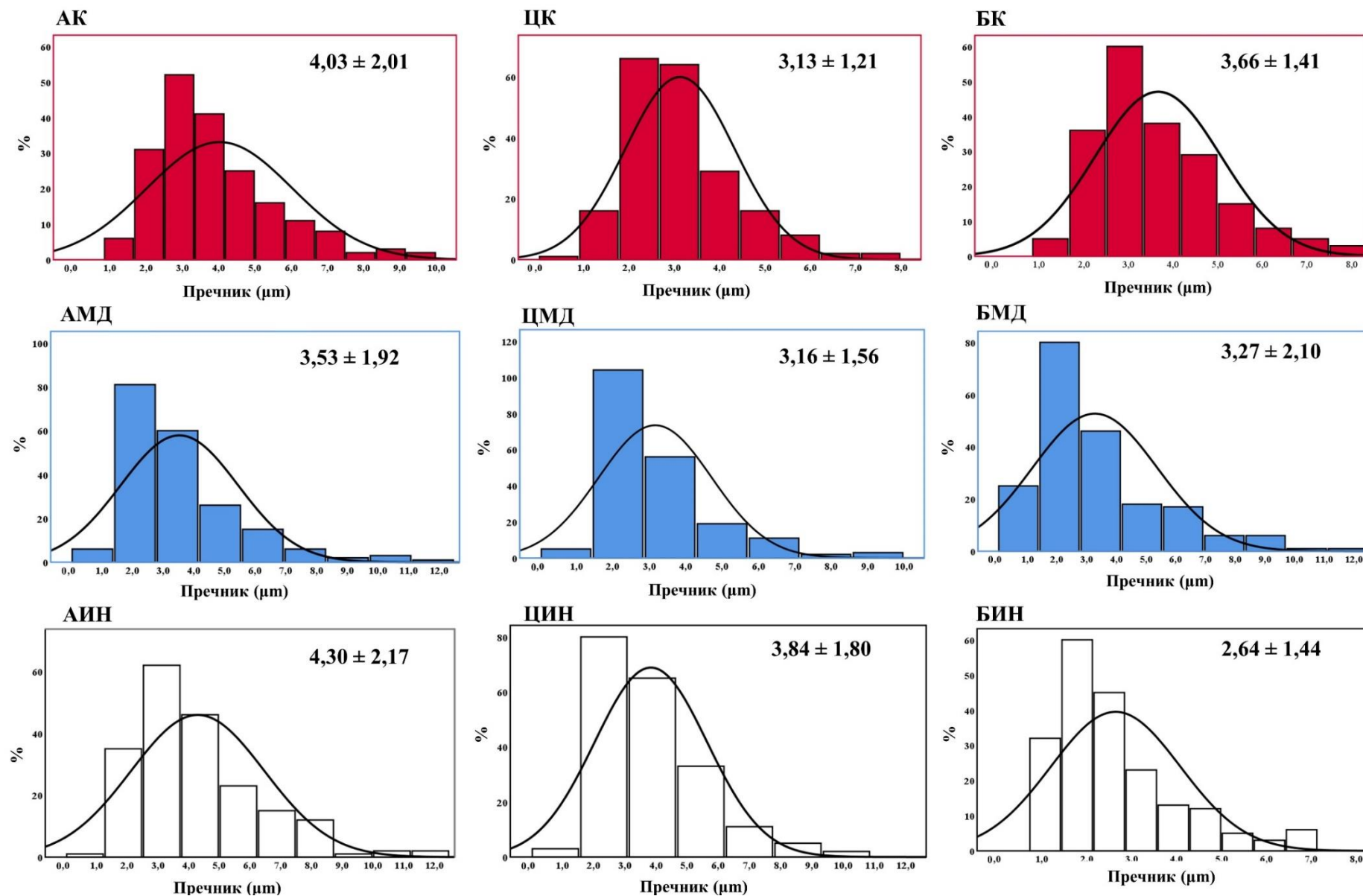


Слика 5.5. SEM слике контролних узорака и инкапсулата

За разлику од контролних узорака, инкапсулати са малтодекстрином као носачем (**БМД**, **ЦМД** и **АМД**) показали су добре морфолошке карактеристике без урушавања и пуцања честица (**Слика 5.5**). На SEM микрографима анализираних узорака примећено је присуство псеудосферичних честица које су биле већег пречника од сферичних. Ова појава и добијени резултати су у сагласности са истраживањем од стране Saavedra-Leos et al. (2021), који су утврдили да је присуство псеудосферичних честица са неправилним површинама последица брзог испаравања напојне смеше при високим температурама у спреј сушачу. Даље, појава набора на површини инкапсулата са малтодекстрином може бити узрокована брзим сушењем при високим температурама (Lourenço et al., 2020; Gawalek, 2021; Mousavi Kalajahi & Ghandiha, 2022). Инкапсулати са малтодекстрином имали су конкавну површину, што може бити позитиван феномен јер долази до формирања структуре отпорне на механичка оптерећења, уз пружање добре заштите активним компонентама (Mousavi Kalajahi & Ghandiha, 2022).

Са друге стране, употреба инулина довела је до појаве честица са неправилним, глатким и благо набораним површинама, као и склоношћу ка формирању агрегата честица, што је у складу са подацима из литературе (Saavedra-Leos et al., 2014; Araújo-Díaz et al., 2017; Lourenço et al., 2020; Gawalek, 2021; Saavedra-Leos et al., 2021). Даље, већа агрегација примећена је у **БИН**, **ЦИН** и **АИН** инкапсулатима у односу на **БМД**, **ЦМД** и **АМД** (**Слика 5.5**). Поред тога, код ових инкапсулата могу се приметити мање честице слабо дефинисаних сферних облика и са приметним порозним структурама на површини (**Слика 5.5**). Слична запажања су објавили Lourenço et al. (2020) на екстракту коре јабуке инкапсулираном у инулину.

Величина честица је кључан параметар будући да одређује физичке карактеристике инкапсулираних сокова од микробиља. **БК** прах (контрола) је имао већу величину честица ($3,66 \pm 1,41 \mu\text{m}$) у поређењу са **БМД** ($3,27 \pm 2,10 \mu\text{m}$) и **БИН** ($2,64 \pm 1,44 \mu\text{m}$) инкапсулатима (**Слика 5.6**). Додатно, присуство носача је допринело мањој величини и доброј расподели честица **БМД** и **БИН** инкапсулата, притом спречавајући настанак агрегата. Величина честица инкапсулата у овом истраживању била је у складу са резултатима претходних студија о спреј сушеним инкапсулираним екстрактима кеља и сулфорафанима из семена броколија, као и екстракта семена ротквице (Wu et al., 2014; Tian et al., 2015; Ortega-Hernández et al., 2023). Са друге стране, спреј осушени инкапсулирани сокови од микробиља цвекле и амаранта унутар одговарајућих носача имали су различиту величину честица у поређењу са инкапсулираним соковима од микробиља броколија. Разлике примећене између инкапсулата могу потицати од различитих хемијских и физичких својстава материјала коришћених за инкапсулацију (Beirão-da-Costa et al., 2013). **ЦИН** и **АИН** су показали највећу величину честица ($3,84 \pm 1,60 \mu\text{m}$ и $4,30 \pm 2,17 \mu\text{m}$, респективно). Промена у морфологији и величини честица између инкапсулата може се приписати могућој специфичној интеракцији између инулина и екстракта, као што су пријавили Lourenço et al. (2020).



Слика 5.6. Расподела величина честица контролних узорака и инкапсулата

Узимајући у обзир да је величина честица инкапсулата била мања од 5 μm , може се закључити да се инкапсулати могу користити као нови функционални састојци, колоранти или суплементи, без непожељних сензорних ефеката приликом конзумирања (Engelen et al., 2005).

5.2.4. ATR-FTIR анализа инкапсулата

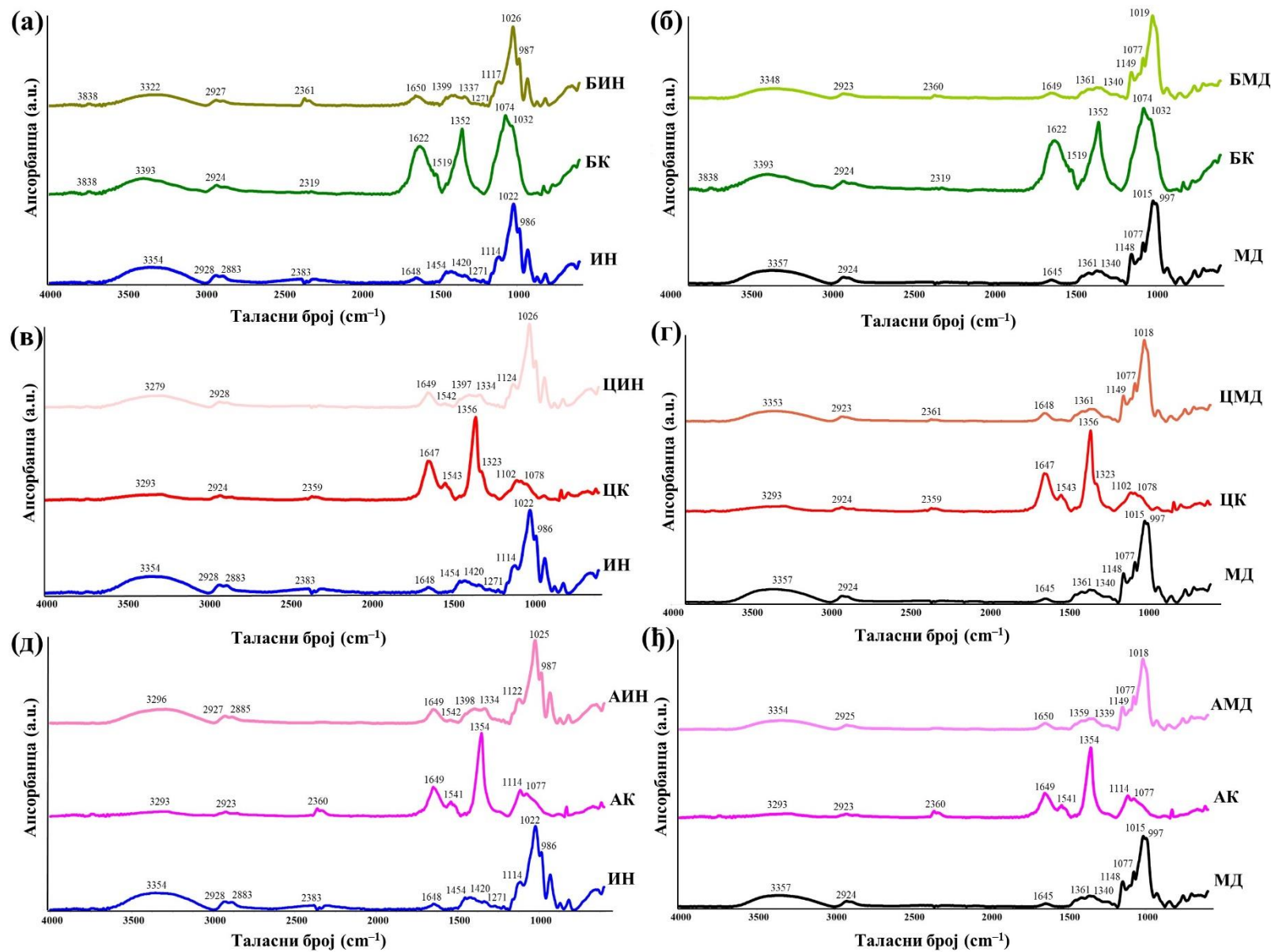
ATR-FTIR анализа је спроведена како би се дошло до важних информација о спреј осушеним инкапсулираним соковима од микробиља и потенцијалним интеракцијама између носача и компоненти сока. FT-IR спектри спреј осушених сокова од микробиља, као и спреј осушених инкапсулираних сокова од микробиља унутар малтодекстрина и инулина, приказани су на **Слици 5.7**.

Идентификоване траке у спектрима малтодекстрина (**МД**) и инулина (**ИН**) карактеристичне су за ове угљене хидрате и њихове структуре: $\sim 3350\text{ cm}^{-1}$ (-OH), $\sim 2900\text{ cm}^{-1}$ (C-H) и траке у спектралном региону $1200\text{--}900\text{ cm}^{-1}$ (C-O и C-C истезањима) (Sarfarazi & Mohebbi, 2020; Martins et al., 2022).

Узимајући у обзир да микробиље цвекле и амаранта припада истој породици биљака Amaranthaceae, њихови контролни прахови показују велику сличност у погледу FT-IR спектара. Спреј осушени сок од микробиља амаранта (**АК**) и цвекле (**ЦК**) показује следеће траке: $\sim 3293\text{ cm}^{-1}$ (O-H вибрационо истезање или CH асиметричном истезању); $\sim 2923\text{ cm}^{-1}$ (C-H симетрично истезање); $\sim 1647\text{--}1649\text{ cm}^{-1}$ (вибрационо истезање C=N везе); $\sim 1541\text{--}1543\text{ cm}^{-1}$ (N-H истезање); $\sim 1354\text{--}1356\text{ cm}^{-1}$ (вибрационо истезање од C-H везе); и траке у спектралном региону $1200\text{--}700\text{ cm}^{-1}$ (C-O, C-O-H и C-O-C модови истезања) (Kanbargi et al., 2017; Sharmila et al., 2019; Aztatzi-Rugiero et al., 2019; Herrera López et al., 2023; Kaur et al., 2024). Траке пронађене у регионима $1077\text{--}1650\text{ cm}^{-1}$ у **АК** и **ЦК** праховима могу бити повезани са беталаинима (Guerrero et al., 2014; Aztatzi-Rugiero et al., 2019; Herrera Lopez et al., 2023). Траке око 1323 cm^{-1} , 1102 cm^{-1} и 1078 cm^{-1} настају услед вибрационог истезања C-H и C-O веза, што такође указује на присуство угљених хидрата у спреј осушеним соковима од микробиља (Sidi-Yacoub et al., 2019; Herrera López et al., 2023).

Када је реч о **БК** праху, широка трака у спектралном региону између $3600\text{--}3000\text{ cm}^{-1}$ потиче од -OH групе, што би могло бити повезано са апсорпцијом једињења која садрже воду, алкоhole, феноле, карбоксилне групе или индолне групе (Soliman et al., 2022; Machado et al., 2022; Langston et al., 2023). Траке у областима од 1350 до 1650 cm^{-1} (C-H вибрације), могу се приписати индол глукозинолатима или њиховим хидролизатима, док траке у областима од 1000 до 1200 cm^{-1} (нарочито C-O вибрацијама), указује на присуство фенолних једињења, угљених хидрата и β -D-тиоглукозе (Beig & Shah, 2023; Langston et al., 2023).

На основу снимљених FT-IR спектара могу се јасно уочити разлике између контролних прахова (**АК**, **ЦК** и **БК**) и инкапсулата (**АМД**, **АИН**, **ЦМД**, **ЦИН**, **БМД** и **БИН**). Међутим, кад је реч о спектрима инкапсулата и носача који су коришћени за процес инкапсулације (малтодекстрин и инулин), они су били веома слични, без јасних разлика и потенцијалних померања која би указала на јаке хемијске интеракције између сокова микробиља и носача (**Слика 5.7**). Даље, постојање слабих међумолекулских интеракција је веома могуће, али оне нису могле у значајној мери да утичу на померање трака. Такође, слична запажања су уочили и Kalušević et al. (2017), сугеришући одсуство јаких хемијских интеракција уочљивих на FT-IR спектрима између инкапсулата екстракта покожице грождја и различитих носача. Узимајући ово у обзир, може се закључити да су активни састојци сокова од микробиља добијени у овој дисертацији највероватније формирали физичке смеше са носачима унутар инкапсулата. На крају, ови резултати потенцијално указују на успешну инкапсулацију активних састојака сокова од микробиља унутар носача.



Слика 5.7. FTIR спектри спреј осушених сокова од микробиља без носача и инкапсулираних у малтодекстрину (б, г и ђ) и инулину (а, в и д).

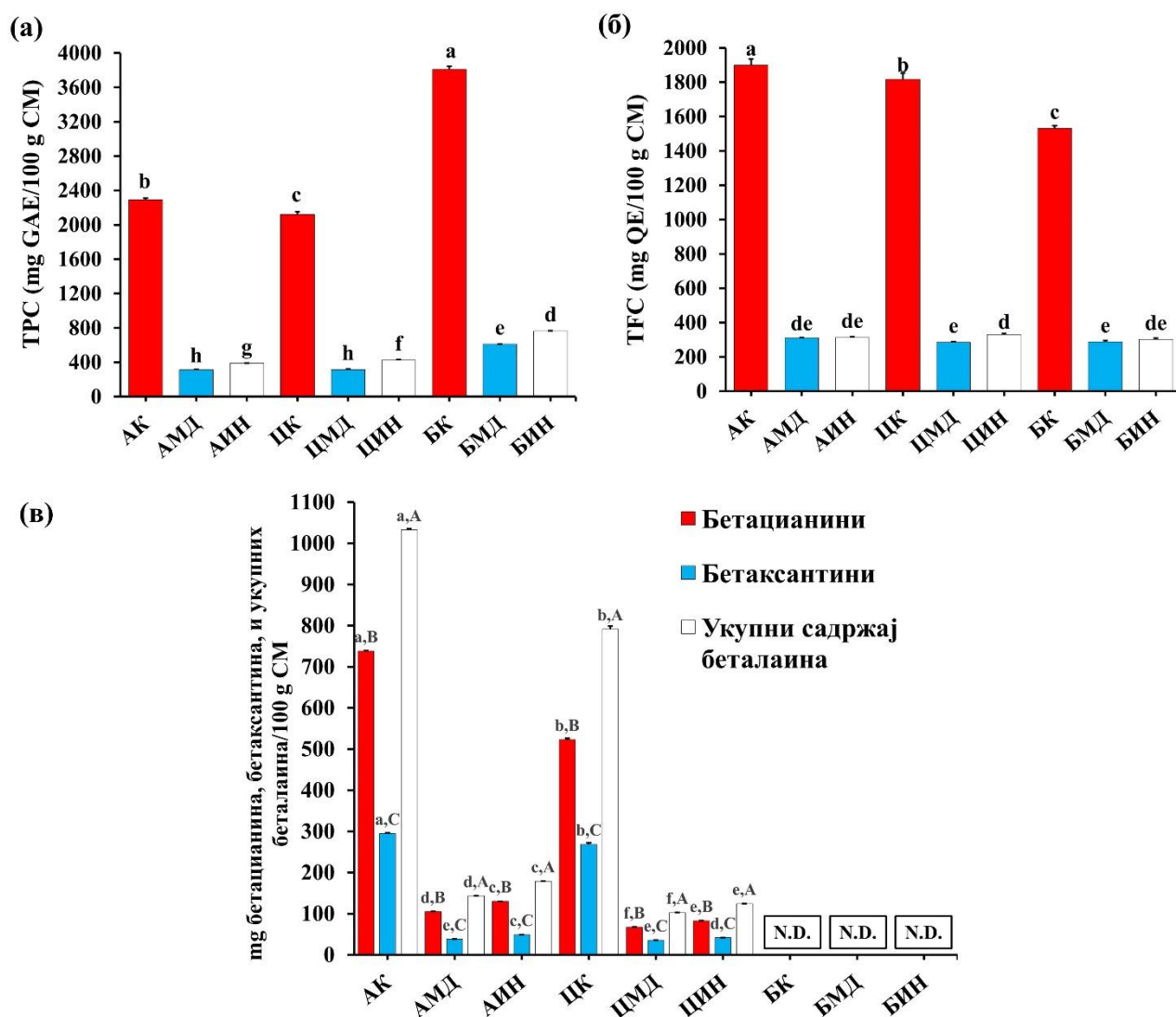
5.2.5. Укупни садржај фенолних једињења, флавоноида и беталаина у инкапсулатима

Резултати за укупан садржај фенолних једињења и флавоноида, као и садржај бетацијанина, бетаксантина и укупних беталаина били су одређени спектрофотометријски и приказани су на **Слици 5.8**. Примењене спектрофотометријске методе нису селективне и у случају узорака који у свом саставу имају велики број различитих једињења (као што су то сокови од микробила) често дају варијабилне резултате. На пример, Фолинов реагенс (Folin–Ciocalteu (F–C)) може лако бити редукован многобројним нефенолним једињењима, што често даје привидно веће концентрације укупних фенолних једињења. Као што се може видети, спреј осушени сокови од микробила без носача (контролни узорци) показали су значајно веће ТРС (**Слика 5.8а**), ТФС (**Слика 5.8б**) и ТВС (**Слика 5.8в**) вредности од оних инкапсулираних у малтодекстрину (**АМД**, **ЦМД** и **БМД**) и инулину (**АИН**, **ЦИН** и **БИН**). У овом случају, добијене ТРС, ТФС и ТВС вредности инкапсулата искључиво зависе само од биоактивних једињења из сокова микробила, јер су ТРС вредности за коришћене носаче показале ниске вредности (3,71 mg GAE/100 g CM за малтодекстрин и 0,96 mg GAE/100 g CM за инулин), као и одсуство ТФС вредности. Узимајући ово у обзир, контролни прашови имају очекивано веће ТРС, ТФС и ТВС вредности у поређењу са њиховим комплементарним инкапсулатима, будући да инкапсулати садрже носаче (10% малтодекстрина или инулина) који смањују удео биоактивних једињења у инкапсулатима. Тачније, повећање удела носача у инкапсулатима доприноси смањењу удела биоактивних једињења из сока микробила, при чему се то последично одражава и на смањење ТРС, ТФС и ТВС вредности инкапсулата. Ова тврдња се може додатно потврдити и ефектом разблаживања коришћених носача на биљни екстракт, као што су претходно известили други аутори (Nadeem et al., 2011; Caliskan & Nur Dirim, 2013; Saavedra-Leos et al., 2021). Tomsone et al. (2020) су показали значајно смањење ТРС и ТФС са повећањем садржаја малтодекстрина у инкапсулатима сока рена, док су Daniel Daza et al. (2017) показали смањење ТРС вредности повећањем садржаја инулина у инкапсулатима екстракта плода *Sagaita* (*Eugenia dysenterica* DC.). Што се тиче ТРС вредности у инкапсулатима, оне су се кретале од 312,33 mg GAE/100 g CM (**АМД**) до 764,02 mg GAE/100 g CM (**БИН**) (**Слика 5.8а**). Ови резултати за ТРС били су у складу са резултатима Akbas et al. (2017) који су инкапсулирали сок од пшеничне траве коришћењем различитих пропорција носача (малтодекстрин и серум протеини млека) техником лиофилизације. Saavedra-Leos et al. (2021) пријавили су нешто ниже ТРС вредности за инкапсулиране сокове од стабљике и цветова зрелог броколија унутар малтодекстрина са истим учешћем носача (10%) као што је примењено и у оквиру ове докторске дисертације, па се може закључити да се спреј осушени инкапсулирани сокови од микробила унутар различитих носача сматрају добрим извором фенолних једињења. Са друге стране, резултати за ТРС добијени у овој дисертацији за инкапсулиране сокове од микробила цвекле и амаранта слични су резултатима који су раније пријављени у студији о спреј осушеним инкапсулираним екстрактима одрасле биљке амаранта (Quelal et al., 2023) и цвекле (Flores-Mancha et al., 2020). Носачи који су коришћени у процесу инкапсулације имају позитиван утицај на заштиту фенолних једињења (Mousavi Kalajahi & Ghandiha, 2022; Ortega-Hernández et al., 2023). Разматрајући резултате између добијених инкапсулата, може се приметити да су инкапсулати са инулином имали нешто веће ТРС вредности ($p < 0,05$) у поређењу са онима са малтодекстрином, што указује на бољи ефекат инулина у заштити фенолних једињења. Са друге стране, Michalska-Ciechanowska et al. (2020) су анализирали спреј осушени сок од бруснице унутар инулина/малтодекстрина и нису пронашли значајну разлику између инкапсулата у погледу ТРС вредности. Ова разлика између наведеног истраживања и ове докторске дисертације може бити последица различитог односа носача и активне компоненте, различитих биљних врста и различитог састава сокова коришћених у истраживањима.

Што се тиче резултата за ТФС, инкапсулати са инулином су показали веће вредности од оних са малтодекстрином (**Слика 5.8б**). **ЦИН** су имали значајно веће вредности

(330,40 mg QE/100 g CM) у поређењу са осталим инкапсулатима. Сличне резултате за TFC пријавили су Pusty et al. (2023) за лиофилизоване инкапсулирани сок од црвеног купуса унутар малтодекстрина, као и Tomsone et al. (2020) за спреј осушени инкапсулирани сок од рена унутар малтодекстрина. Међутим, резултате за TFC треба тумачити са опрезом, јер је TFC метода за одређивање укупног садржаја флавоноида лимитирана и зависи само од флавоноида који показују апсорбацију на датој таласној дужини. Доминантно присутни деривати апигенина из сока од микробиља цвекле не доприносе TFC вредностима комплементарних узорака (контролни прахови и инкапсулати) због одсуства апсорбације на 510 nm (Pękal & Pyrzynska, 2014). Са друге стране, неке фенолне киселине показују значајну апсорбацију на истој таласној дужини и вероватно доприносе резултатима за TFC, као што је претходно објашњено (**Потпоглавље 5.1.4**). Из ових разлога се често могу добити више или ниже вредности у зависности од фенолног профила анализираних узорака. Стога, ова метода за одређивање TFC пружа брзи увид у погледу укупног садржаја флавоноида у узорцима, али је за релевантније резултате потребна LC-MS анализа.

Беталаини су најважнији и најзаступљенији пигменти биљака из породице *Amaranthaceae*. Цвекла и амарант су добри извори беталаина, посебно бетацијанина (Ravichandran et al., 2014). Међу инкапсулатима, спреј осушени инкапсулирани сок од микробиља амаранта унутар инулина имао је значајно веће вредности укупних беталаина (178,9 mg/100 g CM), бетацијанина (130,1 mg/100 g CM) и бетаксантина (48,8 mg/100 g CM) у поређењу са осталим инкапсулатима (**Слика 5.8в**). Као што је и очекивано, сви спреј осушени инкапсулирани сокови од микробиља цвекле и амаранта показали су већи садржај бетацијанина него бетаксантина. Ови резултати за TBC су у складу са резултатима из претходних студија за спреј осушене и лиофилизоване зреле биљке цвекле и амаранта (Ravichandran et al., 2014; Singh & Nathan, 2017; Carmo et al., 2018; Flores-Mancha et al., 2020; Quelal et al., 2023;). Када је реч о поређењу резултата у погледу TBC, у овој дисертацији су забележене веће вредности у поређењу са студијом Flores-Mancha et al. (2020) на лиофилизованом екстракту зреле цвекле унутар малтодекстрина/инулина. Насупрот томе, постигнут је већи садржај TBC у овој дисертацији у поређењу са резултатима које је пријавила Gawalek (2020) за спреј осушени сок од цвекле. Разлике у резултатима у погледу TBC вредности се могу објаснити чињеницом да је у горенаведеним студијама коришћена техника лиофилизације као метода инкапсулације, као и да је за инкапсулацију коришћен екстракт зреле цвекле за разлику од ове дисертације, где су коришћени сок од микробиља и техника спреј сушења. Носачи који су коришћени за инкапсулацију сока од микробиља цвекле и амаранта имали су главни ефекат на одржавање укупног садржаја беталаина, укључујући бетацијанине и бетаксантине, при чему је инулин показао боља својства заштите беталаина у поређењу са малтодекстрином. Беталаини нису детектовани у БМД и БИН.



Слика 5.8. Укупни садржај фенолних једињења (А) и укупни садржај флавоноида (Б), укупни садржај бетацијанина, бетаксантина и укупних беталаина (В) инкапсулата. Различита мала слова означавају значајну разлику између инкапсулата; различита велика слова означавају значајну разлику у погледу бетацијанина, бетаксантина и укупних беталаина унутар инкапсулата, према Duncan тесту ($p < 0,05$). Скраћенице: „Н.Д.“ - нису детектовани.

5.2.6. UHPLC Q-ToF MS анализа инкапсулата

У анализираним контролним праховима и инкапсулатима идентификовано је укупно 47 фенолних једињења и 11 беталаина, док глукозинолати нису детектовани (Табела 5.9).

Табела 5.9. Карактеризација и идентификација биоактивних једињења у спреј осушеним соковима од микробилја амаранта, цвекле и броколија без носача и инкапсулираним у малтодекстрину и инулину, коришћењем UHPLC Q-ToF MS уређаја. За свако детектовано једињење дато је ретенционо време (tR), молекулска формула, израчуната маса, нађена маса и MS фрагменти.

Број једињења	Назив једињења	tR	Молекулска формула	Израчуната маса	Нађена маса m/z	mDa	MS фрагменти
<i>Фенолне киселине (Хидроксibenзоева киселина и деривати)</i>							
1	Бензоева киселина	5,80	C ₇ H ₅ O ₂ ⁻	121,02900	121,03002	-1,02	/
2	Карбокси бензоева киселина	5,66	C ₈ H ₅ O ₄ ⁻	165,01880	165,02126	-2,46	105,0153(52), 108,01557(13), 120,01972(38), 121,03064(100) , 122,0288(11), 123,98797(27), 124,01902(39), 135,03938(17) , 147,89078(8), 151,98009(24), 152,01142(32), 152,03936(13)
3	Бензоилјабучна киселина	7,94	C ₁₁ H ₉ O ₆ ⁻	237,03990	237,04514	-5,24	115,00996(3), 121,03099(100) , 122,03327(10)
4	Хидроксibenзоева киселина	3,91	C ₇ H ₅ O ₃ ⁻	137,02390	137,02614	-2,24	/
5	Карбокси хидроксibenзоева киселина	6,53	C ₈ H ₅ O ₅ ⁻	181,01370	181,01425	-0,55	107,03045(15), 117,01854(9), 119,02354(100) , 120,02938(16) , 134,03764(30), 135,04871(14), 137,02869(26)
6	Метокси хидроксibenзоева киселина	7,13	C ₉ H ₇ O ₅ ⁻	195,02930	195,02999	-0,69	105,03564(19), 106,04326(31), 107,05109(100) , 108,05476(8)
7	Хидроксibenзоил јабучна киселина	6,84	C ₁₁ H ₉ O ₇ ⁻	253,03480	253,03892	-4,12	121,0305(100) , 122,03324(10)
8	Хексозид хидроксibenзоеве киселине is, I	1,68	C ₁₃ H ₁₅ O ₈ ⁻	299,07724	299,08054	-3,30	137,02478(100) , 138,03012(10), 139,03335(3)
9	Хексозид хидроксibenзоеве киселине is, II	5,78	C ₁₃ H ₁₅ O ₈ ⁻	299,07724	299,08174	-4,50	137,02525(100) , 138,03074(9), 139,03024(2)
10	Пентозил хексозид хидроксibenзоеве киселине is, I	2,22	C ₁₈ H ₂₃ O ₁₂ ⁻	431,11950	431,12048	-0,98	137,02489(100) , 138,0282(8)
11	Пентозил хексозид хидроксibenзоеве киселине is, II	3,49	C ₁₈ H ₂₃ O ₁₂ ⁻	431,11950	431,12487	-5,37	137,02508(100) , 138,02588(9), 139,03408(1)
12	Дихексозид хидроксibenзоеве киселине	3,46	C ₂₄ H ₁₉ O ₁₀ ⁻	467,09837	467,09935	-0,98	137,02546(100) , 138,02844(9), 299,07742(2) , 431,11988(7)
13	Дихидроксibenзоева киселина is, I	2,35	C ₇ H ₅ O ₄ ⁻	153,01933	153,02154	-2,21	108,02289(100) , 109,02942(81), 110,03109(6)
14	Дихидроксibenзоева киселина is, II	4,23	C ₇ H ₅ O ₄ ⁻	153,01933	153,02021	-0,88	106,99759(65), 107,02932(52), 108,02181(100) , 123,0203(34)
15	Пентозид дихидроксibenзоеве киселине	4,71	C ₁₂ H ₁₃ O ₈ ⁻	285,06159	285,06303	-1,44	108,02308(100) , 109,02908(22), 110,03117(2), 152,0117(47) , 153,01639(9)
16	Хексозид дихидроксibenзоеве киселине	2,35	C ₁₃ H ₁₅ O ₉ ⁻	315,07216	315,07571	-3,55	108,02276(100) , 109,02909(39), 152,0115(62) , 153,01805(18)
17	Пентозил хексозид дихидроксibenзоеве киселине	5,32	C ₁₈ H ₂₃ O ₁₃ ⁻	447,11390	447,11985	-5,95	108,02294(13), 109,02886(14), 152,01139(100) , 153,01609(14), 163,03867(6), 315,06655(3) , 447,11525(46)
18	Ванилозид	3,76	C ₁₄ H ₁₇ O ₈ ⁻	313,09289	313,09243	0,46	106,04142(13), 107,05097(100) , 108,05235(9), 109,02965(15), 123,04593(33) , 151,03913(12), 152,00977(4), 153,04502(23)
19	Хексозид ванилинске киселине	3,02	C ₁₄ H ₁₇ O ₉ ⁻	329,08781	329,09010	-2,30	108,02216(100) , 109,02686(8), 123,04648(43), 124,05394(5), 152,01197(72), 167,03498(37) , 168,04511(6)
20	Пентозил хексозид ванилинске	4,43	C ₁₉ H ₂₅ O ₁₃ ⁻	461,13007	461,13222	-2,16	108,02255(5), 123,0461(7), 152,01219(18), 153,01611(3), 167,03743(100) ,

	киселине						168,03823(10)
21	Хексозид сиригинске киселине	4,98	C ₁₅ H ₁₉ O ₁₀ ⁻	359,09837	359,10193	-3,56	123,00841(32), 138,03245(100) , 139,03497(9), 153,05634(29), 166,99757(10), 182,02195(59), 197,04455(30)
Фенолне киселине (Хидроксициметна киселина и деривати)							
22	Хексозид кумаринске киселине	6,27	C ₁₅ H ₁₇ O ₈ ⁻	325,09230	325,09815	-5,85	117,03542(6), 119,05126(100) , 120,0544(11), 145,02965(22) , 163,03982(24) , 164,04358(3), 325,11678(2)
23	Кумароил-хининска киселина is, I	5,78	C ₁₆ H ₁₇ O ₈ ⁻	337,09289	337,09853	-5,64	111,04525(5), 119,0519(100) , 163,04062(50) , 164,04373(7), 173,04485(4), 191,05639(60) , 192,05873(6)
24	Кумароил-хининска киселина is, II	6,88	C ₁₆ H ₁₇ O ₈ ⁻	337,09289	337,09441	-1,52	111,04461(18), 119,05083(44) , 163,04021(26) , 173,04546(100) , 174,04845(10), 191,05486(3)
25	Хексозид кафеинске киселине	5,39	C ₁₅ H ₁₇ O ₉ ⁻	341,08781	341,08963	-1,82	133,03021(22), 134,04532(12), 135,0457(14), 161,02512(100) , 162,02873(13), 179,0353(8)
26	3-О- кафеоил-хининска киселина	4,37	C ₁₆ H ₁₇ O ₉ ⁻	353,08781	353,08897	-1,16	134,03782(4), 135,04526(77) , 161,02447(4), 173,04561(3), 179,03454(42) , 191,05576(100) , 192,05779(9)
27	5-О- кафеоил-хининска киселина	6,19	C ₁₆ H ₁₇ O ₉ ⁻	353,08781	353,08964	-1,83	135,04518(1), 161,02423(2), 173,04537(1), 191,05535(100) , 192,05952(10)
28	Хидроксиферулинска киселина	11,25	C ₁₀ H ₉ O ₅ ⁻	209,04555	209,04494	0,60	105,0353(100) , 107,01457(58), 149,02305(77) , 193,01427(63) , 209,05211(10)
29	Хексозид ферулинске киселине	6,67	C ₁₆ H ₁₉ O ₉ ⁻	355,10346	355,10148	1,98	134,03788(100) , 135,04236(12), 149,06103(28), 178,02699(62) , 193,05045(37) , 194,05423(6)
30	Ферулоил изолимунска киселина	7,62	C ₁₆ H ₁₅ O ₁₀ ⁻	367,06707	367,07204	-4,97	111,01116(100) , 112,01504(9), 134,03864(2), 173,0102(4), 191,01981(1)
31	Синапинска киселина	7,88	C ₁₁ H ₁₁ O ₅ ⁻	223,06120	223,06222	-1,03	121,03083(100) , 135,04562(13), 149,0248(50), 165,01966(27), 166,02189(3), 193,01415(60)
32	Синапоил јабучна киселина	7,94	C ₁₅ H ₁₅ O ₉ ⁻	339,07216	339,07540	-3,24	115,00466(47), 133,01555(43) , 149,02485(100) , 164,04799(86), 179,07164(2), 223,06201(7)
33	Хексозид синапинске киселине	6,59	C ₁₇ H ₂₁ O ₁₀ ⁻	385,11402	385,11652	-2,50	149,0249(21), 164,04814(56), 175,00416(12), 179,07006(14), 190,02741(100) , 191,03253(25), 205,05101(99) , 206,05692(45), 223,06204(12)
Фенолни амини							
34	N-транс-Ферулоил 3-О-метилдопамин	8,96	C ₁₉ H ₂₂ NO ₅ ⁺	344,14980	344,15090	-1,10	105,07465(4), 117,03304(31), 119,05251(12), 121,07903(4), 131,07871(5), 145,02742(100) , 149,06386(13), 151,07609(19) , 177,05254(73)
Апигенин С-гликозиди							
Витексин деривати							
35	2"-Пентозил витексин	7,61	C ₂₆ H ₂₉ O ₁₄ ⁺	565,15570	565,15710	-1,40	283,05961(16), 313,07235(100) , 337,06988(17), 367,08061(16), 397,09213(41), 415,10412(74), 433,11439(100)
36	2"-Хексозил витексин	7,54	C ₂₇ H ₃₁ O ₁₅ ⁺	595,16630	595,16690	-0,60	271,05864(29), 283,05857(17), 313,07096(100) , 337,06908(18), 397,09047(29), 415,10158(45), 433,11330(88)
37	2"-Хексозил-6"-ацетил витексин	7,81	C ₂₉ H ₃₃ O ₁₆ ⁺	637,17690	637,18029	-3,39	295,05731(4), 313,07099(10) , 355,07892(28), 397,08981(6), 415,1022(10), 457,11212(12), 475,12261(100)
38	2"-Хексозил-6"-малонил витексин	7,95	C ₃₀ H ₃₃ O ₁₈ ⁺	681,16670	681,16740	-0,70	271,05829(18), 295,05869(21), 313,07124(100) , 337,06845(13), 475,12196(14), 501,10122(23), 519,11398(60)
Цитозиозид деривати							
39	Цитозиозид (3'-Метил витексин)	8,62	C ₂₂ H ₂₃ O ₁₀ ⁺	447,12910	447,12910	0,00	297,07369(51), 327,08459(100) , 351,08325(22), 357,09475(14), 393,09369(15), 411,10245(31), 429,11973(16)
40	6"-Ацетил цитозиозид	9,30	C ₂₄ H ₂₅ O ₁₁ ⁺	489,13914	489,14090	-1,76	297,07399(33), 327,08457(95) , 351,08458(13), 369,09543(100) , 381,09465(18), 393,0946(15), 411,10515(34), 429,11597(45), 471,12673(16)
41	2"-Пентозил цитозиозид	8,42	C ₂₇ H ₃₁ O ₁₄ ⁺	579,17140	579,17350	-2,10	297,07455(14), 327,08471(100) , 351,08507(15), 381,09569(14), 411,10778(43), 429,11745(71), 447,12758(95)
42	2"-Малонил-6"-ацетил-цитозиозид	9,57	C ₂₇ H ₂₇ O ₁₄ ⁺	575,14010	575,14230	-2,20	297,07009(12), 309,07356(51), 327,08490(66) , 351,08416(19), 369,09491(100) , 393,09659(13), 471,12529(9)
43	2"-Рамнозил цитозиозид	8,35	C ₂₈ H ₃₃ O ₁₄ ⁺	593,18700	593,18840	-1,40	297,07382(12), 327,08500(57) , 351,08323(12), 381,09555(11), 411,10577(34),

44	2"-Хексозил цитозинозид	8,29	C ₂₈ H ₃₃ O ₁₅ ⁺	609,18190	609,18360	-1,70	429,11685(58), 447,12726(100) 297,0745(16), 327,08443(100) , 351,08518(18), 393,09525(8), 411,10730(28), 429,11858(50), 447,12725(91) 327,08520(8) , 369,09659(27), 393,095(2), 411,1064(7), 429,11649(9), 471,12713(10), 489,13824(100)
45	2"-Хексозил-6"-ацетил цитозинозид	8,69	C ₃₀ H ₃₅ O ₁₆ ⁺	651,19250	651,19370	-1,20	297,07421(10), 309,07355(18), 327,08652(100) , 351,08389(12), 453,11612(11), 459,1265(11), 471,12537(12), 489,13655(10), 515,11691(21), 533,12804(49) 285,07413(24), 297,07361(9), 309,0747(21), 327,08591(100) , 351,08405(12), 393,09558(8), 453,11656(10), 471,12822(12), 489,13732(17) , 515,11729(27), 533,12837(77)
46	2"-Хексуронил-6"-Ацетил цитозинозид	8,76	C ₃₀ H ₃₃ O ₁₇ ⁺	665,17180	665,17380	-2,00	
47	2"-Хексуронил-6"-малонил цитозинозид	8,56	C ₃₁ H ₃₅ O ₁₈ ⁺	695,18230	695,18370	-1,40	
Беталаини							
Бетаксантини							
48	Беталаминска киселина	3,77	C ₉ H ₁₀ NO ₅ ⁺	212,05590	212,05630	-0,40	106,02933(9), 120,04541(100) , 121,04752(12), 122,04679(2), 138,05475(1), 148,03895(8) , 166,04686(1) 116,06977(4), 119,03611(3), 136,06104(100) , 137,06315(9), 148,03999(60), 149,0426(8), 212,04485(2), 220,05971(2) , 237,08656(3) , 248,05396(2), 266,06773(3) , 283,0931(33), 284,09499(8) 106,06209(17), 132,05113(14), 133,07531(35), 147,08681(14), 148,04801(12), 150,05399(16) , 173,07035(14), 189,13652(35) , 191,081(100) , 192,0843(17), 205,12734(11) , 233,12402(17) , 325,13602(10)
49	γ-Аминобутирна киселина-бетаксантин	3,16	C ₁₂ H ₁₅ N ₂ O ₆ ⁺	283,09300	283,09330	-0,30	
50	Изолеуцин-бетаксантин	6,94	C ₁₅ H ₂₁ N ₂ O ₆ ⁺	325,14000	325,13990	0,10	
(Изо)Амарантин и деривати							
51	Амарантин	2,68	C ₃₀ H ₃₅ N ₂ O ₁₉ ⁺	727,18340	727,18497	-1,57	389,09891(100) , 551,15238(7)
52	Изоамарантин	4,91	C ₃₀ H ₃₅ N ₂ O ₁₉ ⁺	727,18340	727,18490	-1,50	389,09846(100) , 551,15149(6)
53	Декарбокси-дехидро-(изо)амарантин	5,86	C ₂₉ H ₃₃ N ₂ O ₁₇ ⁺	681,17790	681,18521	-7,31	297,08472(8), 299,09872(3), 343,09128(100) , 505,14465(28)
(Изо)Бетанин и деривати							
54	Бетанин	5,11	C ₂₄ H ₂₇ N ₂ O ₁₃ ⁺	551,15130	551,15207	-0,77	150,05397(2), 343,09093(2), 345,10575(1), 389,09784(100) , 390,09898(32), 551,15028(5), 552,15204(2) 150,05306(2), 389,09587(100) , 390,09998(25), 391,10097(5), 551,14783(4), 552,15265(2) 150,05354(2), 299,09934(2), 345,10594(100) , 346,11157(27), 347,11135(4), 507,15752(3) 269,08944(5) , 297,08512(20) , 298,0888(5), 299,09874(3), 343,08991(100) , 344,09432(24), 345,10667(49), 505,14342(10), 506,14492(4)
55	Изобетанин	5,59	C ₂₄ H ₂₇ N ₂ O ₁₃ ⁺	551,15130	551,15260	-1,30	
56	2 или 17-Декарбокси(изо)бетанин	6,13	C ₂₃ H ₂₇ N ₂ O ₁₁ ⁺	507,16150	507,16866	-7,16	
57	2 или 17-Декарбоксинеобетанин	6,13	C ₂₃ H ₂₅ N ₂ O ₁₁ ⁺	505,14580	505,15302	-7,22	
58	6'-О-Ферулоилбетанин	7,41	C ₃₄ H ₃₅ N ₂ O ₁₆ ⁺	727,19870	727,20100	-2,30	389,09754(100)

Скраћенице: „Is.“-изомери. Подебљани фрагменти-главни фрагменти за идентификована једињења.

Пре инкапсулације, глюкоинолати су вероватно трансформисани у изотиоцијанате због ензимске активности ензима мирозиназе током припремања сокова од микробиља процесом хладног цеђења (Le et al., 2020). Узимајући у обзир ову претпоставку, добијени контролни прахови и инкапсулати вероватно садрже различите продукте разлагања глюкоинолата (изотиоцијанати), који итекако доприносе њиховим функционалним својствима (Alloggia et al., 2023). Сва идентификована једињења су типична за микробиље броколија, цвекле и амаранта, као и за њихове сокове (Табеле 5.2 и 5.5). Семи-квантитативно одређивање фенолних једињења показало је доминантно присуство фенолних киселина и њених деривата у контролним узорцима (АК и БК) и спреј осушеним и инкапсулираним соковима од микробиља амаранта (АМД и АИН) и броколија (БМД и БИН), док су у ЦК и њеним комплементарним инкапсулатима (ЦМД и ЦИН) најчешће детектовани апигенин С-гликозиди, као што су различити деривати витексина и цитозиозида (Табела 5.10). Фенолне киселине и њени деривати били су доминантна класа фенолних једињења у спреј осушеним и инкапсулираним соковима од микробиља амаранта и броколија, при чему се њихов садржај кретао од 167,78 (АМД) до 602,91 (АК) mg/100 g CM, и од 308,47 (БМД) до 562,94 (БК) mg/100 g CM. Висок садржај деривата хидроксициметне киселине у спреј осушеним и инкапсулираним соковима од микробиља амаранта превасходно је био због високог садржаја ферулоил изолимунске киселине, док су друга детектована једињења била присутна у траговима. Доминантно присуство различитих хидроксицинамоил-изоцитрата у *Amaranthus* врстама раније је публиковано у студији од стране Masike et al. (2017). Са друге стране, синапинска киселина, хексозид синапске киселине и синапоил јабучна киселина биле су доминантно присутне у свим спреј осушеним и инкапсулираним соковима од микробиља броколија (51–71% укупних семи-квантификованих **ФЈ**), а затим и 3-О-кафеоил-хининска киселина и кумароил-хининска киселина изомер I. Ови резултати показују да спреј осушени и инкапсулирани сокови од микробиља броколија (БК, БМД и БИН) превасходно садрже синапинску киселину и њене деривате. Претходне студије су такође потврдиле висок садржај синапинске киселине и њених деривата у микробиљу броколија и другим врстама из фамилије Brassica (Vallejo et al., 2002; Liu et al., 2022). Детектовани деривати хидроксибензоеве киселине углавном су били у облику различитих гликозида, међутим, већина њих је била присутна у траговима (< LOQ). Пентозил хексозид гликозиди хидроксибензоеве, дихидроксибензоеве и ванилинске киселине, заједно са дихексозидом хидроксибензоеве киселине и бензоил јабучном киселином, били су најзаступљенији деривати хидроксибензоеве киселине у спреј осушеним и инкапсулираним соковима од микробиља амаранта. Са друге стране, иако у малим количинама, бензоева киселина, хидроксибензоева киселина и њихови карбокси деривати били су доминантно потврђени у спреј осушеним и инкапсулираним соковима од микробиља броколија. Што се тиче спреј осушеног и инкапсулираног сока од микробиља цвекле, било је детектовано неколико деривата фенолних киселина, док су хидроксибензоева киселина, хексозид хидроксибензоеве киселине, пентозид и хексозид дихидроксибензоеве киселине били семи-квантификовани, али у малим количинама (< LOQ). У овим узорцима (ЦК, ЦМД и ЦИН) доминантно су били присутни различити апигенин С-гликозиди, пре свега деривати цитозиозида (43–57% свих квантификованих **ФЈ**). Међу дериватима цитозиозида, 2"-хексозил-6"-ацетил цитозиозида је био доминантно присутан у свим спреј осушеним и инкапсулираним соковима од микробиља цвекле (24,01–35,08 mg **ВР** (витексин 2"-рамнозида)/100g CM), након чега су следили 2"-пентозил цитозиозида и 2"-хексозил цитозиозида. Узимајући у обзир добијене резултате, сви спреј осушени и инкапсулирани сокови од микробиља цвекле представљају богат извор деривата витексина и цитозиозида са доказаном антиоксидативном, антиканцерогеном и антиинфламаторном активношћу (Isayenkova et al., 2006; Ninfali et al., 2017; Silva et al., 2020). Флавоноиди нису детектовани у анализираним спреј осушеним и инкапсулираним соковима од микробиља амаранта и броколија. Како се може приметити, сви контролни прахови (АК, БК и ЦК) имали су значајно већи садржај појединачних и укупно семи-квантитативних фенолних једињења у поређењу са инкапсулатима (АМД, АИН, ЦМД, ЦИН, БМД и БИН).

Ово се може објаснити присуством носача (10% малтодекстрина или инулина у инкапсулатима), који доводе до смањења у садржају биоактивних једињења у инкапсулатима, као што је претходно дискутовано у **Потпоглављу 5.2.5**. Резултати укупних фенолних једињења коришћењем течне хроматографије су били у сагласности са ТРС резултатима добијеним спектрофотометријском методом, показујући сличан тренд између контролних прахова и инкапсулата. На крају, садржај укупних/појединачних фенолних једињења у контролним праховима и инкапсулатима може бити варијабилан због присуства и утицаја носача, деградације изазване спреј сушењем или потенцијалним интрамолекуларним интеракцијама између фенолних једињења и носача.

Као што је и очекивано, беталаини су детектовани у спреј осушеним и инкапсулираним соковима од микробиља амаранта и цвекле (**Табела 5.9**). Изоамарантин и амарантин су били карактеристични за спреј осушене и инкапсулиране сокове од микробиља амаранта, док су (изо)-бетанин и 6'-О-ферулоил-бетанин потврђени у спреј осушеним и инкапсулираним соковима од микробиља цвекле (**Табела 5.11**). Ови пигменти су раније пријављени у разним производима од цвекле (Sawicki et al., 2019), осушеним екстрактима цвекле (Nemzer et al., 2011) и различитим екстрактима амаранта (Li et al., 2015). Декарбокси-облици амарантина и бетанина нису били детектовани у контролним узорцима (**АК** и **ЦК**), већ само у инкапсулатима (**АМД**, **АИН**, **ЦМД** и **ЦИН**), што указује да носачи вероватно спречавају деградацију ових једињења током спреј сушења. Такође, декарбокси-дехидро-(изо)амарантин је детектован у **АМД** и **АИН** инкапсулатима, док су декарбокси (изо)бетанин и декарбокси необетанин потврђени у **ЦМД** и **ЦИН** инкапсулатима, чинећи око 1% свих детектованих беталаина у инкапсулатима (**Табела 5.10**). Такође су нађени неки бетаксантини који, у зависности од анализираних инкапсулата, чине од 7,75 до 33,50% свих детектованих беталаина (**Табела 5.11**). Беталаминска киселина и изолеуцин-бетаксантин потврђени су у спреј осушеним и инкапсулираним соковима од микробиља амаранта и цвекле (осим **АИН**), док је γ -аминобутирна киселина-бетаксантин потврђена само у спреј осушеним и инкапсулираним соковима од микробиља цвекле.

Табела 5.10. Семи-квантификација фенолних једињења у спреј осушеним соковима од микробиља амаранта, цвекле и броколија без носача и инкапсулираним у малтодекстрину и инулину коришћењем UHPLC Q-ToF MS уређаја. За свако детектовано једињење дато је ретенционо време (tR), молекулска формула, израчуната маса, нађена маса и MS фрагменти.

Број једињења	Назив једињења	Прахови (mg/100g CM)								
		Амарант			Цвекла			Броколи		
		АК	АМД	АИН	ЦК	ЦМД	ЦИН	БК	БМД	БИН
<i>Фенолне киселине (Хидроксibenзоева киселина и деривати)</i>										
1	Бензоева киселина ^a	-	<LOQ	<LOQ	-	<LOQ	-	8,41	5,42	5,54
2	Карбоксибензоева киселина ^a	5,25	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	18,28	9,70	17,18
3	Бензоилјабучна киселина ^a	37,98	7,63	12,71	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ
4	Хидроксibenзоева киселина ^a	20,65	9,31	9,11	21,34	4,29	5,13	88,85	35,13	45,27
5	Карбокси хидроксibenзоева киселина ^a	<LOQ	-	-	-	-	-	27,00	6,78	10,04
6	Метокси хидроксibenзоева киселина ^a	-	-	-	-	-	-	23,74	<LOQ	<LOQ
7	Хидроксibenзоил јабучна киселина ^a	15,06	<LOQ	<LOQ	-	-	-	<LOQ	<LOQ	<LOQ
8	Хексозид хидроксibenзоеве киселина is, I ^a	<LOQ	<LOQ	<LOQ	-	-	-	<LOQ	-	<LOQ
9	Хексозид хидроксibenзоеве киселине is, II ^a	<LOQ	<LOQ	<LOQ	9,08	4,60	6,11	<LOQ	-	<LOQ
10	Пентозил хексозид хидроксibenзоеве киселине is, I ^a	19,07	5,54	<LOQ	-	-	-	-	-	-
11	Пентозил хексозид хидроксibenзоеве киселине is, II ^a	52,82	11,89	16,90	-	-	<LOQ	-	-	-
12	Дихексозид хидроксibenзоеве киселине ^a	17,26	7,78	11,17	-	-	-	-	-	-
13	Дихидроксibenзоева киселина is, I ^a (као протокатехуинска киселина)	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	-	<LOQ	-
14	Дихидроксibenзоева киселина is, II ^a (као гентизинска киселина)	-	-	-	7,19	<LOQ	<LOQ	4,48	<LOQ	<LOQ
15	Пентозид дихидроксibenзоеве киселине ^a	<LOQ	<LOQ	<LOQ	69,29	15,38	26,21	-	-	-
16	Хексозид дихидроксibenзоеве киселине ^a	-	<LOQ	-	-	-	-	26,36	10,54	16,51
17	Пентозил хексозид дихидроксibenзоеве киселине ^a	30,50	6,97	10,98	-	-	-	-	-	-
18	Ванилозид ^a	-	-	-	-	-	-	<LOQ	<LOQ	<LOQ
19	Хексозид ванилинске киселине ^a	8,62	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	-	6,57	<LOQ	6,10
20	Пентозил хексозид ванилинске киселине ^a	74,43	17,69	25,50	-	-	-	-	-	-
21	Хексозид сиригинске киселине ^a	<LOQ	-	-	-	<LOQ	4,96	9,19	3,67	6,59
<i>Фенолне киселине (Хидроксциметна киселина и деривати)</i>										
22	Хексозид кумаринске киселине ^a	4,32	<LOQ	<LOQ	-	<LOQ	-	-	-	-
23	Кумароил-хининска киселина is, I ^a	-	-	-	-	-	-	9,18	3,67	6,58
24	Кумароил-хининска киселина is, II ^a	<LOQ	<LOQ	<LOQ	-	-	-	-	-	-
25	Хексозид кафеинске киселине ^a	-	-	-	<LOQ	-	-	<LOQ	-	-
26	3-О- кафеоил-хининска киселина ^a	2,44	-	-	-	-	-	26,86	3,33	6,37
27	5-О- кафеоил-хининска киселина ^a	-	-	-	-	-	-	-	<LOQ	<LOQ
28	Хидроксиферулинска киселина ^a	-	-	-	-	-	-	<LOQ	-	<LOQ
29	Хексозид ферулинске киселине ^a	6,85	-	-	<LOQ	<LOQ	<LOQ	-	-	-

30	Ферулоил изолимунска киселина ^a	307,66	100,97	169,38	-	-	-	-	-	-
31	Синапинска киселина ^a	<LOQ	<LOQ	<LOQ	-	-	-	69,60	43,95	50,40
32	Синапоил јабучна киселина ^a	-	-	-	-	-	-	218,22	157,23	176,23
33	Хексозид синапинске киселине ^a	-	-	-	-	-	-	26,20	29,05	29,90
Σ		602,91	167,78	255,75	106,90	24,27	42,41	562,94	308,47	376,71
Фенолни амини										
34	N-транс-Ферулоил 3-O-метилдопамин ^c	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Апигенин С-гликозиди										
Витексин деривати										
35	2"-Пентозил витексин ^b	-	-	-	14,77	12,03	13,87	-	-	-
36	2"-Хексозил витексин ^b	-	-	-	9,76	9,13	10,37	-	-	-
37	2"-Хексозил-6"-ацетил витексин ^b	-	-	-	1,71	1,33	1,52	-	-	-
38	2"-Хексозил-6"-малонил витексин ^b	-	-	-	10,75	8,65	10,26	-	-	-
Σ		-	-	-	36,99	31,14	36,02	-	-	-
Цитозиозид деривати										
39	Цитозиозид (3'-Метил витексин) ^b	-	-	-	2,68	<LOQ	<LOQ	-	-	-
40	6"-Ацетил цитозиозид ^b	-	-	-	8,05	1,60	2,37	-	-	-
41	2"-Пентозил цитозиозид ^b	-	-	-	23,44	18,05	19,85	-	-	-
42	2"-Малонил-6"-ацетил- цитозиозид ^b	-	-	-	<LOQ	<LOQ	<LOQ	-	-	-
43	2"-Рамнозил цитозиозид ^b	-	-	-	1,38	-	1,92	-	-	-
44	2"-Хексозил цитозиозид ^b	-	-	-	23,16	16,42	18,67	-	-	-
45	2"-Хексозил-6"-ацетил цитозиозид ^b	-	-	-	35,08	24,01	26,66	-	-	-
46	2"-Хексуронил-6"-Ацетил цитозиозид ^b	-	-	-	8,38	5,55	6,61	-	-	-
47	2"-Хексуронил-6"-малонил цитозиозид ^b	-	-	-	9,44	5,92	7,00	-	-	-
Σ		-	-	-	111,61	71,55	83,08	-	-	-
$\Sigma\Sigma$		602,91	167,78	255,74	255,50	126,96	161,51	562,93	308,47	376,71

Скраћенице: “-” неидентификована фенолна једињења; Садржај индивидуалних фенолних киселина и њених деривата били су изражени у еквивалентима гентизинске киселине^a. Садржај индивидуалних апигенин С-гликозида били су изражени у еквивалентима витексин 2"- рамнозида^b.

Табела 5.11. Карактеризација и релативни садржај (%) беталаина у спреј осушеним соковима од микробиља амаранта и цвекле без носача и инкапсулираним у малтодекстрину и инулину, коришћењем UHPLC Q-ToF MS уређаја.

Број једињења	Назив једињења	Прахови					
		Спреј осушени и инкапсулирани сокови од микробиља амаранта			Спреј осушени и инкапсулирани сокови од микробиља цвекле		
		АК	АМД	АИН	ЦК	ЦМД	ЦИН
<i>Беталаини (%)*</i>							
<i>Бетаксантини</i>							
48	Беталаминска киселина	2,28	16,11	12,55	1,11	8,90	6,05
49	γ-Аминобутирна киселина- бетаксантин	-	-	-	28,42	1,96	1,03
50	Изолеуцин-бетаксантин	5,46	6,59	-	3,97	4,59	4,01
Σ		7,75	22,70	12,55	33,50	15,46	11,09
<i>(Изо)Амарантин и деривати</i>							
51	Амарантин	78,90	67,61	76,07	-	-	-
52	Изоамарантин	7,50	4,15	4,40	-	-	-
53	Декарбокси-дехидро-(изо)амарантин	-	1,45	1,07	-	-	-
Σ		86,40	73,21	81,55	-	-	-
<i>(Изо)Бетанин и деривати</i>							
54	Бетанин	5,85	4,09	5,90	56,32	70,54	74,70
55	Изобетанин	-	-	-	4,85	5,23	5,27
56	2 или 17- Декарбокси(изо)бетанин	-	-	-	-	0,62	-
57	2 или 17- Декарбоксинеобетанин	-	-	-	-	1,77	1,71
58	6'-О- Ферулоилбетанин	-	-	-	5,33	6,37	7,23
Σ		5,85	4,09	5,90	66,50	84,54	88,91
ΣΣRC (%), беталаини		100	100	100	100	100	100

* Релативни садржај (%) појединачних беталаина одвојено за сваки узорак (учешће укупне површине је дефинисано као 100%).

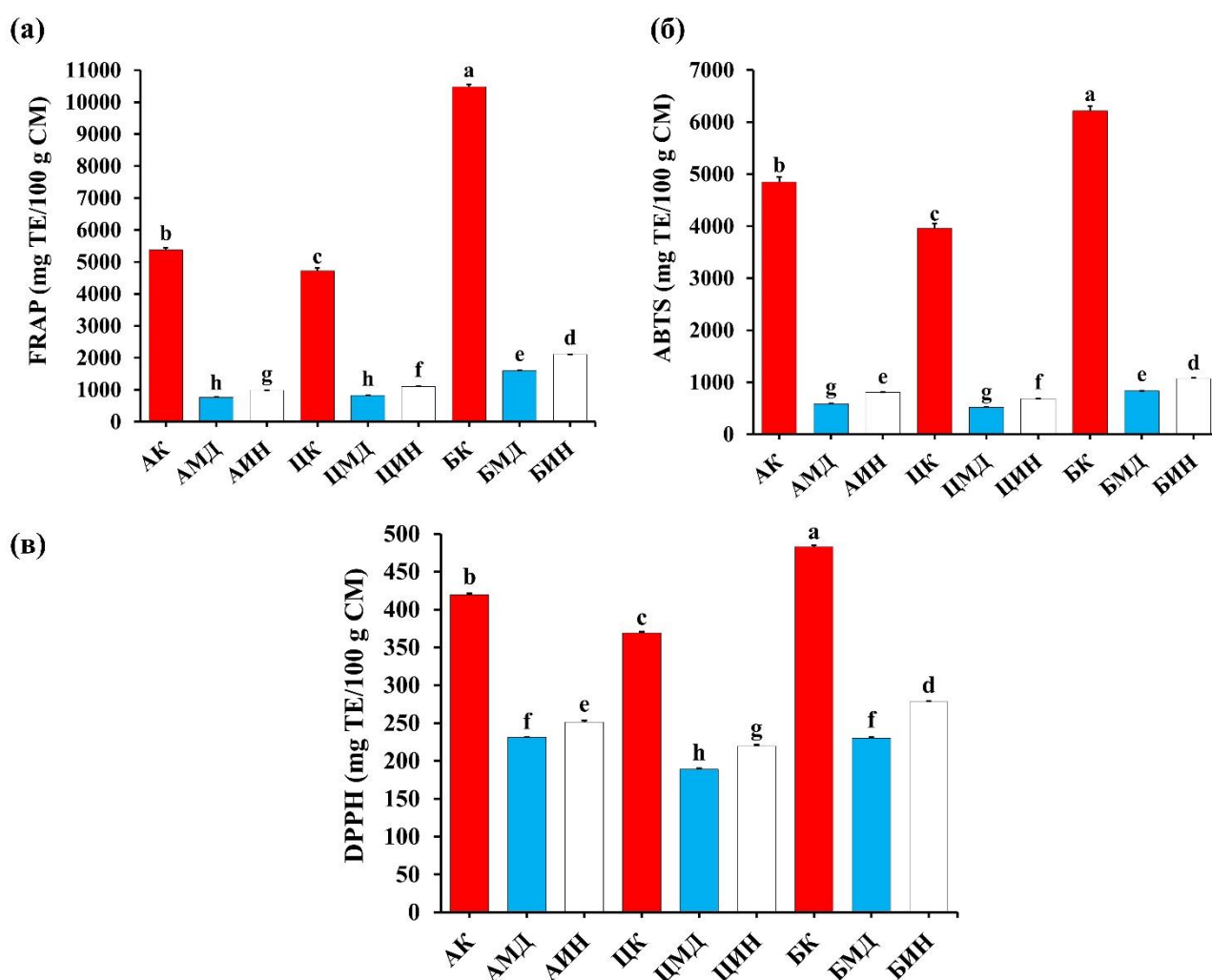
Скраћенице: “-” неидентификовани беталаини.

5.2.7. Антиоксидативна активност инкапсулата

Антиоксидативна активност анализираних контролних прахова и инкапсулата је одређена коришћењем три спектрофотометријске методе – ABTS⁺•, DPPH[•], и FRAP методе. Контролни узорци имали су веће вредности за антиоксидативну активност од њихових комплементарних инкапсулата. Као што је претходно објашњено за TPC/TFC/TBC и фенолни садржај одређен хроматографски, присуство носача је такође допринео и смањењу антиоксидативне активности у инкапсулатима, због смањења удела биоактивних једињења у инкапсулатима. Штавише, претходне студије су показале да угљенохидратни носачи имају занемарљиву способност уклањања слободних радикала (Mishra et al., 2014; Tolun et al., 2016). Исти аутори су доказали да инкапсулати који садрже већу концентрацију носача (малтодекстрин или гума арабика) (5–9%) показују смањену активност према DPPH[•], што додатно поткрепљује ове резултате. Сви инкапсулати показали су добар капацитет за редукцију FRAP комплекса, а вредности су се кретале од 763,82 (АМД) до 2106,42 (БИН) mg TE/100 g CM (Слика 5.9а). Поред тога, инкапсулати су показали најнижу активност према DPPH[•] радикалима (Слика 5.9в), а највећу активност према ABTS⁺• радикалима (Слика 5.9б). Резултати за антиоксидативну активност били су у складу са претходним студијама објављеним од стране Tomsone et al. (2020) и Flores-Mancha et al. (2020) на инкапсулатима сока рена и сока цвекле. Међутим, сви инкапсулати су показали већу активност према ABTS⁺• у поређењу са DPPH[•] радикалом, што се може објаснити различитом природом/поларношћу инкапсулираних биоактивних компоненти из сокова микробиља.

Коначно, сви инкапсулати имали су високу антиоксидативну активност захваљујући садржају биоактивних једињења, при чему постоји јака позитивна корелација између резултата за TPC (укупни садржај фенолних једињења) и резултата добијених помоћу антиоксидативних тестова DPPH[•] ($r=0,704$), ABTS⁺• ($r=0,922$) и FRAP ($r=0,998$). Ово указује

да фенолна једињења највише доприносе антиоксидативној активности инкапсулата. Са друге стране, инкапсулати са инулином имали су јачу антиоксидативну активност од оних са малтодекстрином, што сугерише да носач има значајан утицај на антиоксидативну активност инкапсулата. Слична запажања су пријављена у студији Michalska-Ciechanowska et al. (2020) на спреј осушеном соку од бруснице и у студији Turkiewicz et al. (2020) на спреј осушеном соку од јапанских дуња. Антиоксидативна активност зависи од носача који се користе за инкапсулацију, њихове концентрације, врсте производа који се инкапсулише и технике инкапсулације (Flores-Mancha et al., 2020; Tomsone et al., 2020; Michalska-Ciechanowska et al., 2020; Tekin et al., 2023). Поред тога, варијације у резултатима могу бити последица потенцијалних међумолекулских интеракција између фенола/беталаина и носача, који су делимично умањили способност фенолних једињења или беталаина да „заробе“ радикале или донирају електроне (Michalska, 2017; Flores-Mancha et al., 2020).



Слика 5.9. Антиоксидативна својства процењена коришћењем FRAP (а), ABTS^{••} (б) и DPPH[•] (в) метода у спреј осушеним соковима од микробиља амаранта, цвекле и броколија без носача и инкапсулираним у малтодекстрину и инулину. Различита мала слова означавају значајну разлику између инкапсулата, према Duncan тесту ($p < 0,05$).

5.3. Јогурт обогаћен инкапсулатима сокова од микробиља

Добијени инкапсулати сокова од микробиља амаранта, цвекле и броколија унутар малтодекстрина и инулина представљају добар извор различитих биоактивних компоненти са добро познатом антиоксидативном активношћу. Стога, у овом делу докторске дисертације циљ је примена инкапсулата од сокова микробиља у производњи јогурта, а самим тим и обогаћење производа биоактивним компонентама. Обогаћени јогурти су окарактерисани у погледу текстуралних и физичко-хемијских својстава, заједно са укупним садржајем фенолних једињења и антиоксидативне активности. На крају, извршена су сензорна испитивања укупног квалитета и прихватљивости обогаћеног јогурта од стране потрошача.

5.3.1. Текстурална својства јогурта

Текстурална својства јогурта обогаћених инкапсулатима сока од микробиља приказана су у Табели 5.12.

Табела 5.12. Текстурална својства јогурта обогаћених инкапсулатима од сокова микробиља

Текстурална својства	Узорци						
	К	ЈО-АМД	ЈО-АИН	ЈО-ЦМД	ЈО-ЦИН	ЈО-БМД	ЈО-БИН
Чврстина, g	47,41±9,18 ^c	75,80±9,67 ^a	59,72±6,02 ^b	67,06±4,0 ^{ab}	75,64±4,95 ^a	67,02±2,70 ^{ad}	78,34±1,26 ^a
Конзистенција, g.sec	892,53±102 ^e	1715,18±70,79 ^{bc}	1577,10±12,87 ^d	1695,62±87,24 ^{cd}	2009,25±87,64 ^a	900,78±23,69 ^e	1834,05±43,53 ^b
Кохезивност, g	-42,28±3,29 ^a	-101,60±13,18 ^{de}	-86,12±9,53 ^{bc}	-88,24±11,34 ^{bcd}	-103,87±5,60 ^e	-75,31±3,59 ^b	-98,79±2,44 ^{cde}
Индекс вискозитета, g.sec	-90,37±6,29 ^a	-211,69±9,39 ^c	-188,10±4,55 ^b	-218,87±4,88 ^{cd}	-240,22±12,89 ^e	-190,86±7,41 ^b	-226,22±6,58 ^d

Различита мала слова у истом реду означавају значајну разлику између јогурта у текстуралним својствима, према Duncan тесту ($p < 0,05$).

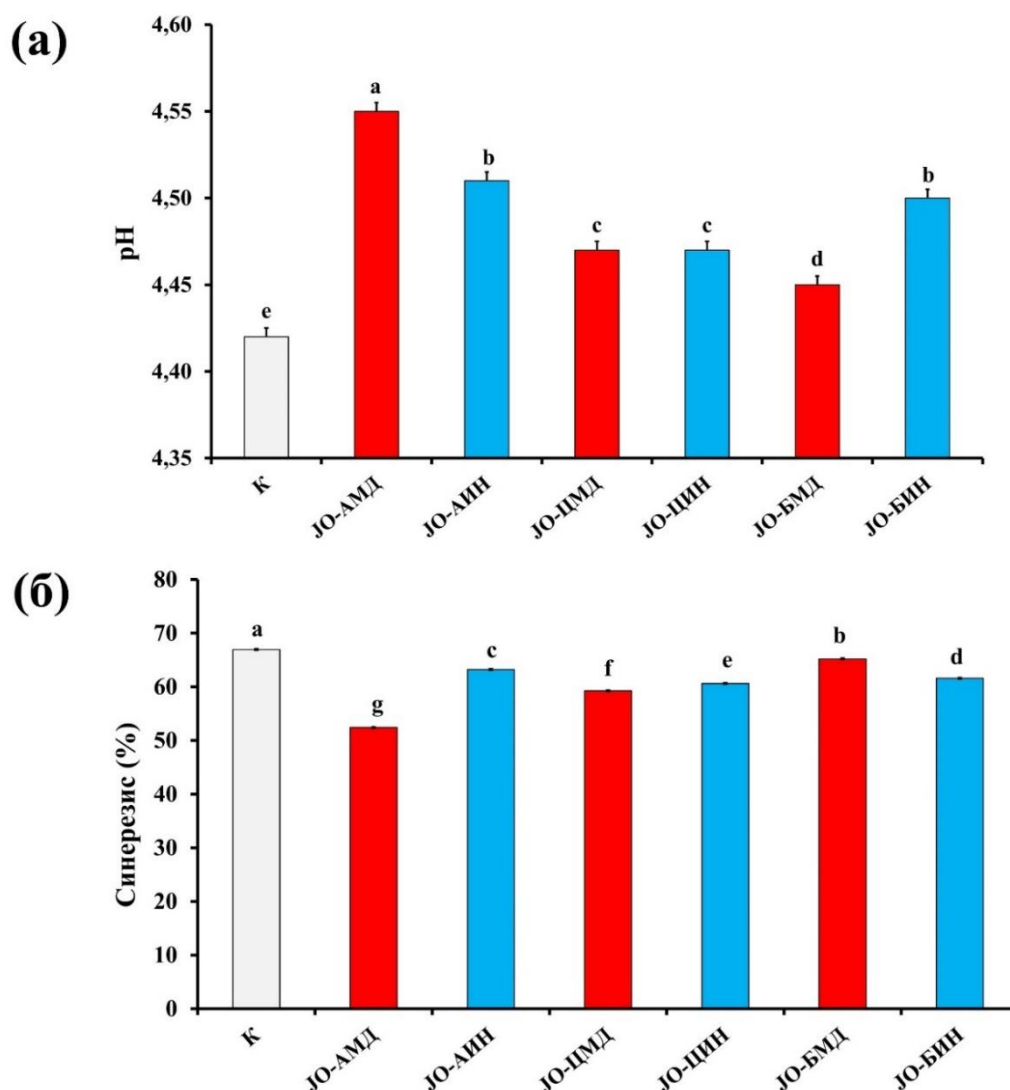
На основу резултата одређивања чврстоће из **Табеле 5.12** може се уочити да је додавање инкапсулата у јогурт довело до повећања чврстоће у поређењу са контролним јогуртом (без додатка инкапсулата) ($p < 0,05$). Штавише, и након периода складиштења, јогурти обогаћени инкапсулатима имали су више вредности чврстоће од контролног јогурта, а вредности су се кретале од 47,41 g (**К**) до 78,34 g (**ЈО-БИН**) у петнаестом дану складиштења. Овај феномен повећања чврстоће у јогуртима обогаћеним инкапсулатима може бити повезан са својствима инулина и малтодекстрина да делују као стабилизатори тако што заробљавају молекуле воде, чиме спречавају њихово кретање између других молекула у матриксу јогурта (Gyawali & Ibrahim, 2016; Pinto et al., 2019). Поред тога, малтодекстрин има способност да интерагује са казеином присутним у млеку преко водоничних веза и дипол-дипол интеракција, чиме игра улогу у стабилизацији јогуртних гелова (Domagała et al., 2006; Lima et al., 2021; Gomes et al., 2022). Ово је у складу са резултатима Pinto et al. (2019), према којима је додавање инкапсулата у јогурт повећало садржај укупне суве материја што директно утиче и на чврстоћу. Слично томе, јогурт обогаћен инкапсулираним витамином D₃ у малтодекстрину и инулину имао је чвршћу структуру у поређењу са јогуртом без додатка инкапсулата, који је имао течнију структуру (Nami et al., 2023).

Интеракције између угљених хидрата и протеина такође су довеле до повећања кохезивности у јогуртима обогаћеним инкапсулатима у поређењу са контролним јогуртом ($p < 0,05$). Кохезивност се сматра важним параметром за текстуру млечних производа који је повезан са прихватањем јогурта од стране потрошача, а и може се дефинисати као силе које штите облик производа кроз његове унутрашње везе (Rashwan et al., 2022; Popescu et al., 2023). Побољшана текстуална својства обогаћених јогурта такође могу бити резултат хидрофобних интеракција између полифенолних једињења инкапсулата и млечних протеина, тачније између ароматичних прстенова полифенола и бочних ланаца аминокиселина, који штите ремоделовање протеина и обезбеђују бољу стабилност производа (Yadav et al., 2018; Pan et al., 2019).

Финално, јогурти обогаћени инкапсулатима имали су бољу конзистентност и индекс вискозности у поређењу са контролним јогуртом, што је вероватно такође резултат додавања инкапсулата, што је потврђено и у студији од стране Mohamed Ahmed et al. (2021) за јогурт обогаћен лиофилизованим екстрактом лишћа *Solenostemma argel* Hayne.

5.3.2. Физичко-хемијски параметри и боја јогурта

Резултати физичко-хемијских параметара (рН и синерезис) код јогурта обогаћених инкапсулатима сокова од микробиља приказани су на **Слици 5.10**.

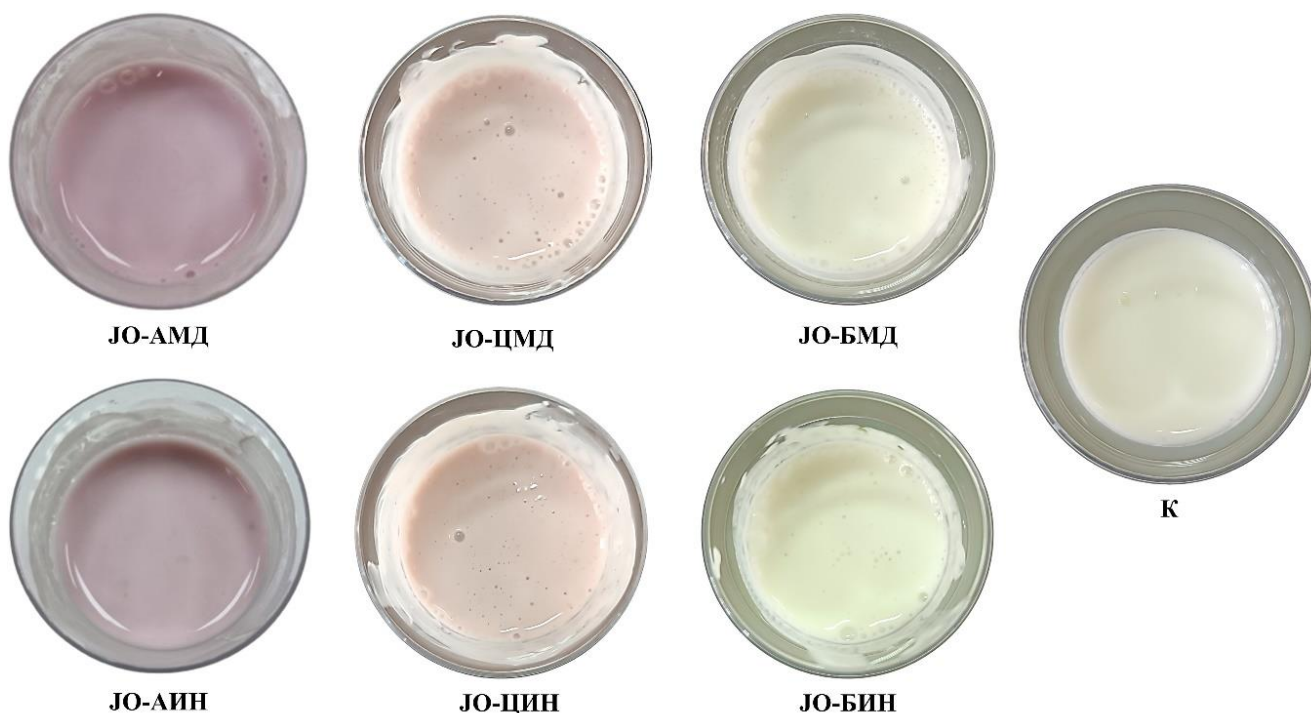


Слика 5.10. Физичко хемијски параметри: pH (а) и синерезис (б) јогурта обогаћених инкапсулатима сокова од микробиља. Различита мала слова означавају значајну разлику између узорка, према Duncan тесту ($p < 0,05$).

Јогурт има типичан киселкаст укус који је узрокован активностима кисело-млечних бактерија, односно јогуртних култура, што резултује pH вредношћу од око 4,4, при чему су јогурти са pH вредношћу између 4,2 и 4,5 омиљени код потрошача (Zbikowska et al., 2020). У поређењу са контролним јогуртом ($p < 0,05$), обогаћивање јогурта инкапсулатима значајно је повећало његов pH. Са друге стране, pH вредност се смањивала у свим јогуртима током периода складиштења, а вредности су се кретале од 4,10 (**К** и **ЈО-АМД**) до 4,26 (**ЈО-БИН**) на крају периода складиштења. Према Правилнику о квалитету производа од млека и стартер култура (Сл. гласник РС бр. 33/2010, 69/2010, 43/2013 и 34/2014) јогурт не сме да има pH вредност мању од 3,8. Ова појава може се приписати активностима бактерија млечне киселине присутних у јогурту, које претварају лактозу у млечну киселину, стварајући киселу средину. Ово може бити и последица активности заосталих стартер култура, чији број расте током складиштења, како је наведено у истраживању Pinto et al. (2019). Поред тога, јогурти обогаћени инкапсулатима показали су мањи пад pH током периода складиштења у поређењу са контролним јогуртом, што сугерише да је обогаћени јогурт био у стању да спречи смањење pH током складиштења. Сличан тренд је примећен када је јогурт обогаћен инкапсулираним витамином D₃ у матрици малтодекстрина и желатина (Nami et al., 2023).

Синерезис је важан параметар квалитета јогурта јер представља процес издвајања сурутке из протеинског матрикса производа, а што је непожељно својство јогурта (Nami et al., 2023). Јогурти обогаћени инкапсулатима показали су мањи обим синерезиса у поређењу са контролним јогуртом, који је имао синерезис од 66,93% (Слика 5.86). Ово је у супротности са истраживањем Sadeghi et al. (2017), у којем је јогурт обогаћен екстрактом клица броколија имао повећан синерезис у односу на контролни јогурт. Са друге стране, Flores-Mancha et al. (2021) известили су да додавање инкапсулата сока од зреле цвекле доводи до смањења синерезиса, што је у сагласности са резултатима овог истраживања. Овај феномен се може приписати чињеници да малтодекстрин и инулин делују као стабилизатори и задржавају воду, што даље резултује јачом мрежом у јогуртном гелу. Nami et al. (2023) су установили да јогурт обогаћен инкапсулираним витамином D₃ унутар малтодекстрина/желатина утиче на смањење синерезиса, стабилизује јогурт и подстиче његово гелирање у поређењу са контролним јогуртом. Исти ефекат може се постићи и интеракцијама између полифенола инкапсулата и протеина јогурта (Mohamed Ahmed et al., 2021; Rashwan et al., 2022). Време складиштења имало је значајан ефекат на одвајање сурутке из јогурта и повећање синерезиса на свим узорцима јогурта (осим **ЈО-БИН** и **ЈО-АИН**).

Слике јогурта обогаћених инкапсулатима сокова од микробиља су приказане на Слици 5.11.



Слика 5.11. Јогурти обогаћени инкапсулатима сокова од микробиља

Параметри боје L*, a*, b*, h° и C* јогурта обогаћених инкапсулатима од сокова микробиља приказани су у Табели 5.13.

Табела 5.13. Параметри боје L*, a*, b*, h° и C* јогурта обогаћених инкапсулатима од сокова микробиља

Узорак	Параметри боје				
	L*	a*	b*	h°	C*
К	81,52±0,02 ^a	-3,08±0,02 ^e	6,24±0,02 ^d	178,89±0,01 ^a	6,96±0,01 ^f
ЈО-АМД	70,62±0,02 ^d	9,38±0,02 ^a	1,83±0,02 ^g	0,18±0,01 ^f	9,55±0,01 ^a
ЈО-АИН	70,06±0,03 ^e	8,44±0,03 ^b	3,49±0,01 ^f	0,39±0,01 ^e	9,14±0,01 ^b
ЈО-ЦМД	70,00±0,04 ^f	5,68±0,05 ^d	5,50±0,02 ^e	0,77±0,01 ^d	7,91±0,01 ^e
ЈО-ЦИН	65,40±0,03 ^g	6,56±0,04 ^c	6,94±0,04 ^c	0,81±0,01 ^c	9,55±0,01 ^a
ЈО-БМД	80,46±0,02 ^b	-3,48±0,02 ^f	7,22±0,01 ^b	177,88±0,01 ^b	8,03±0,01 ^d
ЈО-БИН	79,37±0,06 ^c	-3,82±0,00 ^g	7,92±0,01 ^a	177,88±0,01 ^b	8,79±0,01 ^c

Различита мала слова у колони означавају значајну разлику између јогурта, према Duncan тесту (p<0,05).

Према резултатима приказаним у **Табели 5.13**, додавање инкапсулата у јогурт је генерално смањило вредност L* у поређењу са контролним јогуртом. **ЈО-ЦИН** је имао најнижу осветљеност (65,40 ± 0,03), док је **ЈО-БМД** био најсветлији (80,46 ± 0,02). Јогурти обогаћени инкапсулатима сокова микробиља амаранта и цвекле имали су мању осветљеност, вероватно због повећаних a* вредности, што је последично утицало на боју јогурта (Yousefi et al., 2022). a* вредности су се кретале од 9,38 (**ЈО-АМД**) до -3,08 (**контролни јогурт**). Слично запажање имали су Yousefi et al. (2022), који су утврдили да је повећање a* вредности довело до смањења осветљености јогурта обогаћеног микрокапсулираним екстрактом цвекле унутар малтодекстрина, гуме арабике и серум протеина, што је последица високог садржаја беталаина из цвекле. Како се и очекивало, највиша b* вредност (вредност жуте боје) добијена је за јогурт обогаћен инкапсулатима од сока микробиља броколија. Поред тога, сви јогурти обогаћени инкапсулатима са инулином имали су значајно више b* вредности у поређењу са онима са малтодекстрином, као што је наведено у претходним студијама Raju & Pal (2014) и Flores-Mancha et al. (2021).

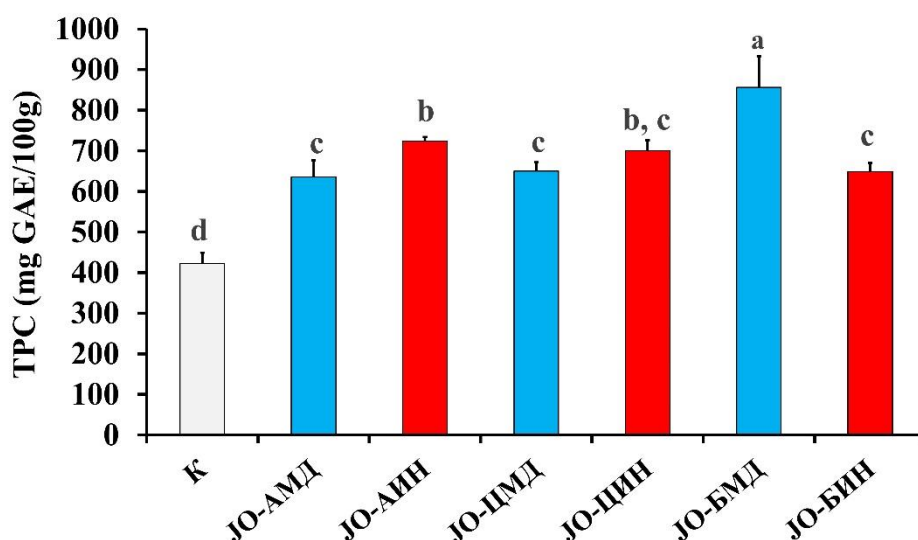
Углови нијансе (h°) су параметар за процену квалитета боје и указују на положај боје на скали боја (Tekin et al., 2023). Јогурти обогаћени инкапсулатима сокова од микробиља цвекле и амаранта имали су h° вредности близу 0° на скали боја, што представља црвене нијансе узорака, док су јогурти обогаћени инкапсулатима сокова од микробиља броколија имали зелене нијансе, што је било и очекивано. Узорци **ЈО-АМД** (9,55) и **ЈО-ЦИН** (9,55) имали су највише C* вредности, што показује добар утицај додатка инкапсулата на zasiћеност боје обогаћених јогурта.

5.3.3. Укупни садржај фенолних једињења и антиоксидативна активност јогурта

Обогађивање кисело-млечних производа биљним екстрактима представља добар начин за производњу јогурта са високим садржајем фенолних једињења, минерала и витамина, као и са високом антиоксидативном активношћу (Sadeghi et al. 2017; Flores-Mancha et al. 2021). Укупан садржај фенолних једињења у јогуртима обогаћеним инкапсулатима сокова од микробиља унутар малтодекстрина или инулина приказан је на **Слици 5.12**. Обогађивање јогурта инкапсулатима значајно је утицало на повећање ТРС вредности у поређењу са контролним јогуртом. **ЈО-БМД** имао је највишу ТРС вредност (856,20 mg GAE/100 g), што је вероватно резултат високог садржаја фенолних једињења у инкапсулатима сока од микробиља броколија. У јогуртима црвене боје, веће ТРС вредности пронађене су у јогуртима обогаћеним инкапсулатима са инулином (**ЈО-АИН** и **ЈО-ЦИН**) у поређењу са онима са малтодекстрином (**ЈО-АМД** и **ЈО-ЦМД**). Другачији резултати које су представили Flores-Mancha et al. (2021) где је јогурт обогаћен инкапсулираним екстрактом цвекле унутар малтодекстрина имао више ТРС вредности од оног обогаћеног инулином, могу бити последица различитих биљних сировина и технике инкапсулације (лиофилизација) коришћених за припрему инкапсулата. С друге стране, вредности за садржај фенолних једињења у контролном јогурту могу бити последица ограничења метода за одређивање ТРС,

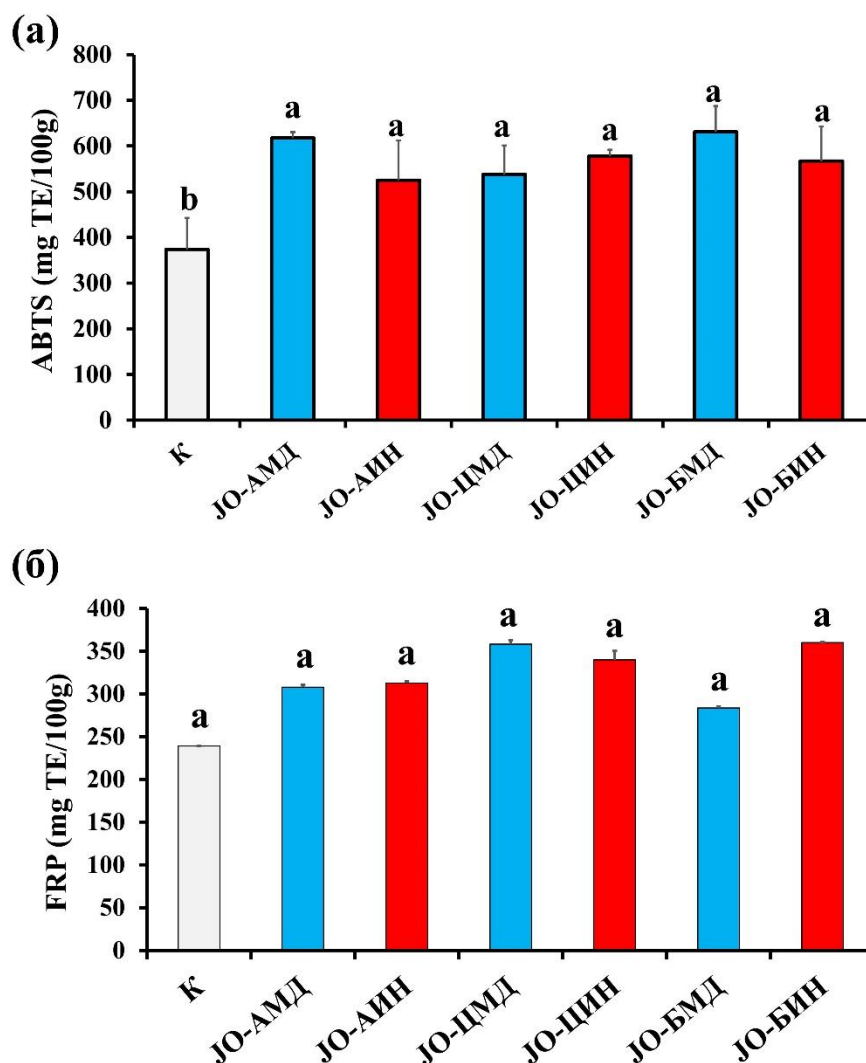
јер неки угљени хидрати (глюкоза) и аминокиселине (тирозин) присутни у јогурту могу да интерагују са F–C реагенсом и доведу до лажно позитивних резултата (Rashwan et al., 2022).

Варијације између обогаћених узорка су биле мале, вероватно због могућих интеракција између полифенолних једињења и протеина јогурта, а тиме и формирања комплекса полифенол-протеин. Полифеноли могу да интерагују са протеинима кроз неколико слабих интеракција, укључујући Ван дер Валсове, хидрофобне, водоничне и јонске силе, што резултује формирањем снажне мреже казеина која смањује синерезис и стабилизује текстуру јогурта (Dönmez et al., 2017).



Слика 5.12. Укупни садржај фенолних једињења у јогуртима обогаћеним инкапсулатима сокова од микробиља унутар малтодекстрина или инулина. Различита мала слова означавају значајну разлику између јогурта, према Duncan тесту ($p < 0,05$).

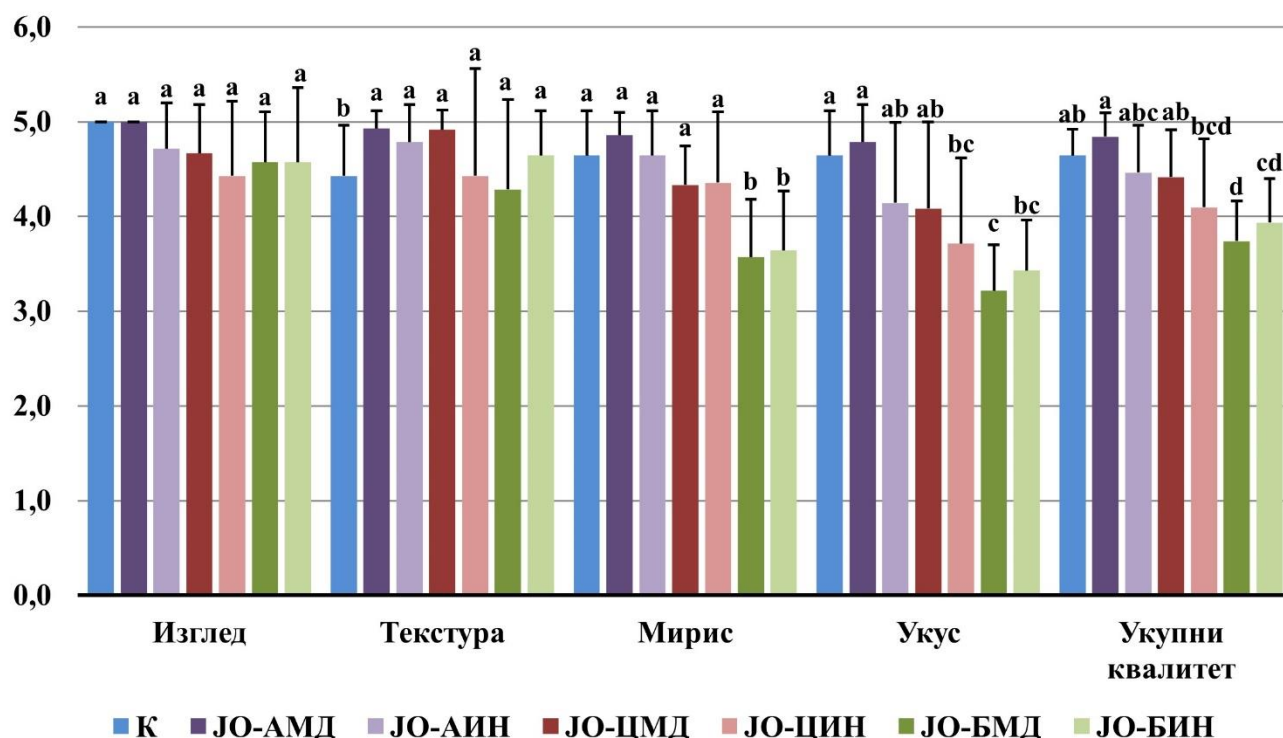
Резултати антиоксидативне активности јогурта обогаћених инкапсулатима сокова од микробиља унутар малтодекстрина или инулина приказани су на **Слици 5.13**. Сви обогаћени узорци јогурта показали су добру тенденцију смањења Fe^{3+} јона (FRP) и имали су више вредности од контролног јогурта. Јогурт обогаћен инкапсулатима сока од микробиља цвекле имао је највише FRP вредности, али није било значајне разлике између обогаћених узорка јогурта. Обогаћени узорци су такође показали значајно вишу $ABTS^{+\bullet}$ активност у поређењу са контролним јогуртом, при чему је највиша $ABTS^{+\bullet}$ вредност забележена у **ЈО-БМД** (631,01 mg TE/100 g). Јака антиоксидативна активност може бити повезана са присутним биоактивним једињењима из микробиља, конкретно полифенолима (Sadeghi et al., 2017; Rashwan et al., 2022), беталаинима (Flores-Mancha et al., 2021) и сумпорним једињењима (Azarashkan et al., 2022).



Слика 5.13. Антиоксидативна активност одређена $ABTS^{+\bullet}$ (а) и FRP (б) методом у јогуртима обогаћеним инкапсулатима сокова од микробиља унутар малтодекстрина или инулина. Различита мала слова означавају значајну разлику између јогурта, према Duncan тесту ($p < 0,05$).

5.3.4. Сензорно испитивање јогурта

Резултати сензорног испитивања укупног сензорног квалитета јогурта обогаћених инкапсулатима сокова од микробиља приказани на **Слици 5.14**.



Слика 5.14. Резултати испитивања укупног сензорног квалитета јогурта обогаћених инкапсулатима сокова од микробиља од стране сензорног панела. Различита мала слова означавају значајну разлику између јогурта, и у оквиру сваког сензорног својства, према Duncan тесту ($p < 0,05$).

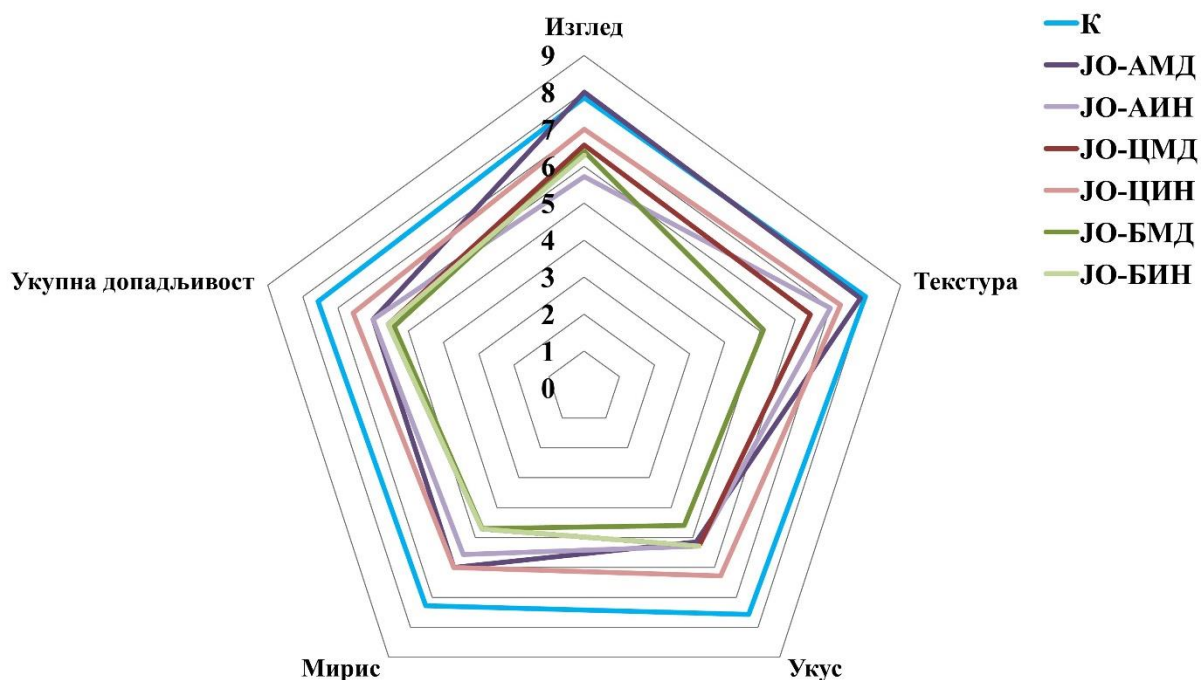
Као што је приказано на **Слици 5.14**, сви обогаћени узорци јогурта имали су одличне резултате у погледу изгледа, као и контролни узорак, и то без значајних разлика. Сви јогурти су имали атрактивну боју, типичну за инкапсулирани биљни материјал коришћен за обогаћивање јогурта. Изглед је био најсличнији између контролног узорка и **ЈО-БМД** или **ЈО-БИН**, што је потврђено резултатима за боју у **Потпоглављу 5.3.2, Табела 5.12**. Узорци **ЈО-АМД** и **ЈО-АИН** добили су највише оцене за изглед; оцењени су као јогурт са воћним карактеристикама, са бојом сличном воћном јогурту од јагоде, а присуство нерастворних честица инкапсулата код оцењивача било је повезано са присуством трагова воћа. Са друге стране, присуство нерастворљивих инкапсулата у **ЈО-ЦИН** узорку негативно је забележено од стране оцењивача, а боја је оцењена нешто нижом оценом у поређењу са осталим узорцима. У претходном истраживању Tekin et al. (2023), утврђено је да атрактиван изглед јогурта обогаћеног инкапсулатима од концентрата сока од цвекле утиче на садржај беталаина, те да се параметри боје повећавају са повећањем садржаја беталаина. Оптималан садржај инкапсулата концентрата сока од цвекле додатих у јогурт био је 0,5% и 1%, као и у овој дисертацији.

Резултати просечних оцена текстуре кретали су се од 4,3 (**ЈО-БМД**) до 4,9 (**ЈО-ЦМД** и **ЈО-АМД**), и били су у опсегу од "врло доброг квалитета" до "одличног квалитета". Уопштено, присуство инкапсулата у јогурту довело је до побољшања густине и боље конзистентности у поређењу са контролним узорком. Ови резултати сензорне оцене текстуре су у складу са резултатима инструменталном анализом текстуре, која је показала већу конзистенцију и чврстину обогаћеног јогурта у поређењу са контролним узорком. Nami et al. (2023) су представили сличне резултате, у којима је јогурт са инкапсулатима имао бољи резултат за текстуралне параметре од контролног узорка.

Што се тиче резултата за укус и мирис, узорци **ЈО-БМД** и **ЈО-БИН** су имали најниже оцене, као последица присуства благих нота на купус, као и присутних киселкастих и

љуткастих нота које су карактеристичне за микробиље броколија, а које вероватно потичу од присутних сумпорних и полифенолних једињења. Иако су сви узорци имали прихватљив квалитет укуса, оцењивачи су напоменули да су киселкасти и земљани укуси били интензивнији у **ЈО-ЦИН** у поређењу са **ЈО-ЦМД**, што сугерише да малтодекстрин боље маскира ове укусе него инулин. **ЈО-АМД** је добио највишу оцену за укус (4,8) захваљујући свом слаткастом укусу, који су оцењивачи позитивно оценили. Овај тип јогурта је без додатог шећера и погодан је за особе са здравственим тегобама (дијабетес, инсулинска резистенција, гојазност итд.). Просечна укупна оцена квалитета узорка **ЈО-БМД** била је значајно нижа у поређењу са другим узорцима, углавном због ниских оцена за укус и мирис. Са друге стране, јогурти обogaћени инкапсулатима сока од микробиља амаранта показали су највише укупне оцене квалитета.

На **Слици 5.15** приказани су резултати за укупну прихватљивост јогурта обogaћених инкапсулатима сокова од микробиља, који су били у опсегу од 6,0 ("умерено ми се свиђа") до 8,3 ("екстремно ми се свиђа"), док је контролни узорак добио највишу оцену (8,5). Резултати хедонске скале показују да су узорци **ЈО-АМД** и **ЈО-АИН** добили највише оцене боје због њихове специфичне црвено-љубичасте боје која је привукла пажњу оцењивача. Поред тога, оцењивачи су сматрали да су јогурти обogaћени инкапсулатима са малтодекстрином имали бољу боју него они са инулином, што је у складу са колориметријским резултатима приказаним у **Потпоглављу 5.3.2, Табела 5.12**. Присуство благог укуса и ароме на купус довело је до нижих оцена за узорке **ЈО-БМД** и **ЈО-БИН**, што је резултирало нижом укупном прихватљивошћу од стране потрошача. Остали узорци су имали типичан укус и арому који се може упоредити са врстама из породице *Amaranthaceae*. Генерално, јогурти обogaћени инкапсулатима показали су добру сензорну прихватљивост од стране потрошача, што указује на потенцијал примене ових инкапсулата као адитива у производњи ферментисаних млечних производа.



Слика 5.15. Резултати испитивања укупне сензорне прихватљивости јогурта обogaћених инкапсулатима сокова од микробиља од стране потрошача приказани путем радар дијаграма.

6. ЗАКЉУЧАК

У првом делу докторске дисертације фокус је био на фитохемијској карактеризацији микробиља амаранта, цвекле и броколија применом течне хроматографије. Микробиље је екстраховано раствором 80%-ог метанола који је садржао 0,1% HCl (1:10 w/v), док је за одређивање глукозинолата додатно коришћен и претходно загрејан (70°C) раствор 70%-ог метанола. На основу добијених резултата изведени су следећи закључци:

- Микробиље амаранта, броколија и цвекле је богато различитим биоактивним једињењима, првенствено фенолним једињењима, а затим беталаинима и глукозинолатима.
- Фенолна једињења су идентификована и квантификована у свим екстрактима испитиваних биљних врста микробиља, при чему је разлика у садржају фенолних једињења између микробиља амаранта, цвекле и броколија била значајна. Укупно је идентификовано и квантификовано 40 различитих фенолних једињења, од којих су доминантно биле присутне фенолне киселине и њени деривати, као и флавоноиди. Највиши садржај детектованих фенолних једињења је пронађен у екстракту микробиља броколија (1588,71 mg/100 g СММ), затим цвекле (1331,01 mg/100 g СММ), док је најнижи садржај био у екстракту микробиља амаранта (646,38 mg/100 g СММ). Фенолне киселине и деривати су највише допринели укупном садржају фенолних једињења у микробиљу броколија (више од 95% укупног садржаја), укључујући различите деривате хидроксibenзоeве, дихидроксibenзоeве и синапинске киселине. Највиши садржај фенолних киселина у екстракту микробиља броколија се огледао у високом садржају синапинске киселине (526,06 mg/100 g СММ) и њених различитих деривата (хексозид синапинске киселине, синапоил јабучна киселина, дисинапоил-дихексозид и трисинапоил-дихексозид), који уједно представљају и доминантна једињења присутна у овој врсти микробиља. Са друге стране, екстракт микробиља амаранта је обиловао различитим дериватима хидроксibenзоeве, дихидроксibenзоeве и ванилинске киселине, укључујући пентозил хексозид гликозиде хидроксibenзоeве, дихидроксibenзоeве и ванилинске киселине који су заједно са ферулоил изолимунском (175,78 mg/100 g СММ) и бензоил јабучном киселином били доминантни у овом екстракту. Додатно, различити дипентозил и пентозил гликозиди дихидроксibenзоeве киселине (252,35 и 59,79 mg/100 g СММ) представљају фенолне киселине које су најзаступљеније у микробиљу цвекле. Микробиље цвекле је представљало изврстан извор флавоноидних једињења и то првенствено апигенин С-гликозида (>70% од укупног садржаја фенолних једињења), укључујући деривате витексина и цитозиозида, који су први пут детектовани у микробиљу ове врсте.
- Беталаини су детектовани само у микробиљу цвекле и амаранта, укључујући (изо)амарантин (73,56%) у микробиљу амаранта и (изо)бетанин (49,20%) у микробиљу цвекле. Ови профили беталаина у микробиљу цвекле и амаранта су први пут анализирани у овој дисертацији.
- Сумпорна једињења, међу којима се издвајају глукозинолати, била су присутна само у микробиљу броколија. У екстракту микробиља броколија (добијеним екстракцијом са 80%-им закишељеним метанолом на собној температури) је идентификован глуконаструтин, док је глюконапин пронађен у екстракту добијеном коришћењем 70%-ог загрејаног метанола. Остали глукозинолати су детектовани у оба екстракта и то: глюкобрасицин, 4-хидрокси-глюкобрасицин, 5-хидрокси-глюкобрасицин, нео-глюкобрасицин и 4-метокси-глюкобрасицин. Разлог различите детекције глукозинолата у екстрактима микробиља броколија лежи у чињеници да су коришћени различити растварачи и различити услови екстракције.

У другом делу докторске дисертације је извршена производња хладно цеђених сокова од микробиља амаранта (АМС), броколија (БМС) и цвекле (ЦМС), као и њихова физичко-хемијска, фитохемијска и сензорна карактеризација. Микробиље је подвргнуто фази сечења, прања и на крају процеса хладног цеђења коришћењем супер-спорог соковника. На основу добијених резултата применом свих ових метода се могу извести следећи закључци:

- Принос сокова од микробиља је био изузетно висок и кретао се од 53,4% (АМС) до 70,2% (БМС).
- Сокови од микробиља су се показали као благо кисели напици са малом количином укупно растворљивих чврстих материја чије вредности су се кретале у опсегу од 1,8 до 2,0 °Вх.
- Глукозинолати који су у великој мери били присутни у микробиљу броколија нису детектовани у соку од микробиља броколија, највероватније због њихове ензимске разградње у изотиоцијанате дејством ензима мирозиназе, што је већ доказано у претходно објављеним студијама. Штавише, ови продукти разградње глукозинолата показују јаку биолошку активност и вероватно доприносе снажној антиоксидативној активности сокова.
- На основу хроматографске анализе фенолних једињења могло се закључити да су сокови од микробиља амаранта, броколија и цвекле показали висок садржај укупних фенолних једињења, и то 49,82 mg/100 mL, 362,35 mg/100 mL и 342,02 mg/100 mL сока, респективно.
- У соковима од микробиља амаранта и броколија доминантно су детектоване фенолне киселине и њихови деривати. У соку микробиља амаранта потврђено је присуство и висок садржај пентозил хексозид гликозида ванилинске киселине и дихидроксibenзојеве киселине, док су у соку микробиља броколија то били деривати синапинске киселине (синапинска киселина, синапоил јабучна киселина и хексозид синапинске киселине).
- Кемпферол-3-О-синапоил-дихексозид-7-О-хексозид био је једини флавоноид детектован у соку од микробиља броколија (БМС), са садржајем од 4,77 mg/100 mL.
- Сок од микробиља цвекле је представљао добар извор апигенин С-гликозида који су се показали као лако растворљиви и да лако прелазе из биљке у сок. Главни представници ове групе једињења су били деривати витексина и цитозиозида.
- У соку од микробиља цвекле били су доминантни деривати цитозиозида, а нарочито 2''-хексозил-6''-ацетил цитозиозид (67,44 mg/100 mL), затим 2''-хексозил цитозиозида (48,94 mg/100 mL) и 2''-пентозил цитозиозида (46,00 mg/100 mL), као и у микробиљу цвекле.
- Хроматографском анализом детектовани су беталаини укључујући амарантин и изоамарантин у соку од микробиља амаранта као доминантно присутни, док су у соку од микробиља цвекле доминантни били бетанин и изобетанин. Беталаминска киселина је била присутна у оба сока. Релативни садржај декарбокси деривата амарантина, бетанина и изобетанина био је низак у оба сока од микробиља (<3% од укупних беталаина).
- На основу спектрофотометријског одређивања укупних фенолних једињења, сокови од микробиља су показали висок укупни садржај фенолних једињења одређен спектрофотометријски, који је износио 92,92 mg GAE/100 mL за сок од микробиља броколија, а нешто мање их је било у соку од микробиља цвекле (71,26 mg GAE/100 mL) и амаранта (50,86 mg GAE/100 mL), што је и у складу са резултатима хроматографске анализе.
- Сокови од микробиља амаранта и цвекле су обилovali црвено-љубичастим пигментима беталаинима. У том смислу, спектрофотометријска анализа укупног садржаја беталаина је показала да је сок од микробиља амаранта имао виши садржај укупних беталаина (36,73 mg/100 mL), бетацијанина (27,39 mg/100 mL) и

бетаксантина (9,34 mg/100 mL) у односу на сок од микробиља цвекле. У овим соковима бетацијанини су показали виши садржај од бетаксантина, као што је и очекивано и у складу са резултатима хроматографске анализе. Такође, ови сокови су показали и висок садржај укупних хлорофила.

- Највишу антиоксидативну активност одређену ABTS⁺ методом имао је узорак сока од микробиља броколија (143,38 mg TE/100 mL), а израженој антиоксидативној активности највероватније је допринео садржај фенолних једињења и изотиоцијаната. Штавише, и остали сокови су показали високу антиоксидативну активност уклањања ABTS⁺ радикала, као и високу тенденцију ка редукцији [Fe³⁺-(TPTZ)₂]³⁺ комплекса.
- Резултати сензорног испитивања укупног квалитета сокова од микробиља показали су да се просечне оцене за укупан квалитет крећу од 3,5 до 4,5 што указује на врло добар квалитет сокова. Са друге стране, применом хедонске скале утврђена је прихватљивост производа од стране потрошача, а резултати указују на то да се потрошачима сокови од микробиља умерено допадају.

У трећем делу ове докторске дисертације фокус је био на производњи инкапсулата од сокова микробиља амаранта (АМС), цвекле (ЦМС) и броколија (БМС). Сокови од микробиља су филтрирани и помешани са носачима – малтодекстрином (МД) или инулином (ИН). У циљу добијања инкапсулата, напојна смеша сачињена од сока микробиља и носача је подвргнута спреј сушењу помоћу лабораторијског спреј сушача. На добијеним инкапсулатима је извршена физичко-хемијска, фитохемијска, морфолошка и спектрофотометријска карактеризација. На основу добијених резултата из овог дела докторске дисертације се могу извести следећи закључци:

- Принос инкапсулата се кретао од 60,54% (ЦИН) до 82,79% (БМД), при чему је виши принос био за спреј осушене инкапсулиране сокове од микробиља унутар малтодекстрина, него за оне унутар инулина. Инкапсулати су се мање лепили и задржавали на зидовима коморе спреј сушача од контролних узорака (сокови сушени без додатка носача), што потврђује и висок принос инкапсулата.
- Инкапсулати су генерално имали високу ефикасност инкапсулације, а вредности су се кретале од 85,71% (ЦМД) до 70,42% (АИН). Резултат ефикасности инкапсулације зависио је од носача, при чему је коришћење малтодекстрина резултирало вишом ефикасношћу инкапсулације у односу на инулин.
- Инкапсулати су имали садржај влаге испод 10%, што је ниже од садржаја влаге контролних узорака. Низак садржај влаге у инкапсулатима може позитивно утицати на њихов рок трајања, што може спречити микробиолошко кварење и нежељене хемијске реакције.
- Вредности насипне и тапкане густине су биле више у инкапсулатима у односу на контролне узорке, при чему су инкапсулати са инулином имали значајно више вредности тапкане и насипне густине у поређењу са онима на бази малтодекстрина.
- Боја добијених инкапсулата је зависила од сока микробиља. Инкапсулати на бази сокова микробиља амаранта и цвекле имали су лепу црвену/љубичасту боју, док су сокови од микробиља броколија имали светлосиву боју са зеленкастим нијансама. Додатак носача је утицао на повећану осветљеност инкапсулата.
- Честице добијених инкапсулата су се одликовале малом величином (<5 µm), а употреба носача у процесу инкапсулације је имала позитиван ефекат на смањење лепљивости инкапсулата, што се може приметити и на основу смањене агломерације честица. Сокови микробиља инкапсулирани унутар малтодекстрина су имали присутан велики број псеудосферичних честица са неправилним површинама и појавом оштрих набора конкавне површине, што се може интерпретирати као позитиван феномен у смислу бољег очувања биоактивних компонената. Сокови

- микробиља са инулином су такође показали велики број псеудосферечних честица са набораном површином, као и појаву благе агрегације између честица.
- FTIR-ATR анализа узорака је доказала да не постоји померање трака у спектрима носача и сокова од микробиља, што указује на то да није било присутних јаких хемијских интеракција између њих. Ови резултати потврђују потенцијално успешну инкапсулацију биоактивних компонената сокова од микробиља унутар коришћених носача.
 - У контролним узорцима су детектоване више вредности укупних фенолних једињења, флавоноида и беталаина (спектрофотометријске методе) у поређењу са инкапсулатима. Генерално, главни разлог за то лежи у томе да применом носача који не садрже фенолна једињења и беталаине долази до разблажења, при чему се ипак не сме занемарити њихов утицај на заштиту биоактивних компонената.
 - Спреј осушени инкапсулирани сокови од микробиља унутар инулина су показали више вредности укупног садржаја фенолних једињења у односу на оне унутар малтодекстрина, са вредностима које су се кретале од 312,33 mg GAE/100 g CM (АМД) до 764,02 mg GAE/100 g CM (БИН). Са друге стране, укупни садржај флавоноидних једињења је највиши био у спреј осушеним инкапсулираним соковима од микробиља цвекле унутар инулина – ЦИН (330,40 mg QE/100 g CM).
 - Спреј осушени инкапсулирани сокови од микробиља цвекле и амаранта унутар одговарајућих носача су се показали као добар извор беталаина, нарочито бетацијанина. АИН је показао највиши садржај укупних беталаина (178,9 mg/100 g CM), бетацијанина (130,1 mg/100 g CM) и бетаксантина (48,8 mg/100 g CM) у поређењу са осталим инкапсулатима.
 - У свим анализираним инкапсулатима је укупно идентификовано 47 фенолних једињења и 11 беталаина коришћењем течне хроматографије. Спреј осушени сокови микробиља инкапсулирани унутар инулина су показали виши садржај фенолних једињења у односу на оне унутар малтодекстрина, што је у складу са резултатима спектрофотометријске анализе. Фенолне киселине и њени деривати су били најзаступљенији у инкапсулатима сокова микробиља амаранта и броколија, укључујући деривате хидроксibenзоеве киселине и деривата хидроксициметне киселине, при чему се њихов садржај кретао од 167,78 (АМД) до 376,71 (БИН) mg/100 g CM. Инкапсулати на бази сока микробиља броколија доминантно су садржали синапинску киселину и њене деривате, док су у инкапсулатима на бази сока микробиља амаранта били доминантно присутни деривати хидроксициметне киселине са највишим садржајем ферулоил изолимунске киселине. Са друге стране, инкапсулати на бази сока микробиља цвекле имали су низак садржај деривата фенолних киселина, али висок садржај апигенин С-гликозида, укључујући деривате цитозиозида (43–57% свих квантификованих фенолних једињења) и витексина. Додатно, међу дериватима цитозиозида, 2"-хексозил-6"-ацетил цитозиозид је био доминантно присутан у свим спреј осушеним и инкапсулираним соковима од микробиља цвекле (24,01–35,08 mg ВР/100g CM), након чега су следили 2"-пентозил цитозиозид и 2"-хексозил цитозиозид.
 - У инкапсулатима сокова од микробиља цвекле и амаранта су доминантно били присутни пигменти беталаини, укључујући присуство амарантина и (изо)амарантина у инкапсулатима сокова од микробиља амаранта, односно бетанина и (изо)бетанина у инкапсулатима сокова од микробиља цвекле. Декарбокси облици амарантина и бетанина нису били детектовани у контролним узорцима, већ само у инкапсулатима (АМД, АИН, ЦМД и ЦИН), што указује да носачи вероватно спречавају деградацију ових једињења, утичући на њихову заштиту током спреј сушења.
 - Сви добијени инкапсулати су показали високу антиоксидативну активност, међу којима су инкапсулати са инулином показали јачу антиоксидативну активност од оних

са малтодекстрином. Антиоксидативна активност је одређена применом три методе, као што су ABTS⁺•, DPPH• и FRAP метода. Инкапсулати су имали добар капацитет редукције FRAP комплекса, а вредности су се кретале од од 763,82 (АМД) до 2106,42 (БИН) mg TE/100 g CM. Додатно, они су показали најнижу активност према DPPH• радикалима, а највишу активност према ABTS⁺• радикалима.

- Генерално, сви добијени спреј осушени инкапсулати су показали добре физичко-хемијске, техно-функционалне и морфолошке карактеристике, па се стога могу користити као потенцијални функционални адитиви или боје у прехранбеној индустрији.

Завршни део ове докторске дисертације односио се на примену добијених инкапсулата у прехранбеном производу, у овом случају, јогурту. У овом делу дисертације су добијени потенцијално функционални производи обogaћени инкапсулатима сокова од микробиља и извршена је карактеризација у погледу текстуалних и физичко-хемијских параметара. Додатно је испитан и садржај укупних фенолних једињења и антиоксидативна активност применом спектрофотометријских анализа, док су сензорна испитивања обухватила примену различитих тестова за одређивање квалитета јогурта и њихове прихватљивости од стране потрошача. На основу добијених резултата овог дела докторске дисертације могу се извести следећи закључци:

- Додавање инкапсулата у јогурт доводи до бољих вредности текстуалних параметара, укључујући више вредности чврстоће и конзистенције у поређењу са контролним јогуртом без додатка инкапсулата. Додатно, јогурти обogaћени инкапсулатима сокова од микробиља су имали и бољу кохезивност и индекс вискозности, па се може закључити да додавање инкапсулата у јогурт утиче позитивно на текстуална својства овог производа.
- Обогаћени јогурти су имали више рН вредности у односу на контролу. Током периода складиштења рН вредност је остала у оквиру вредности која се интерпретира као повољна киселост од стране потрошача. Што се тиче синерезиса, обogaћени јогурти су показали мањи обим синерезиса у поређењу са контролом, што потврђује стабилизујуће дејство инкапсулата у јогурту.
- Боја јогурта највише је зависила од инкапсулата који су коришћени за обogaћивање: благо љубичаста/црвена боја у случају јогурта обogaћених инкапсулатима од сокова микробиља амаранта и цвекле, и благо сива боја (најсличнија контролном узорку), код инкапсулата сока од микробиља броколија.
- Највиши садржај укупних фенолних једињења имао је узорак **ЈО-БМД** (856,20 mg GAE/100 g), што је вероватно последица високог садржаја фенолних једињења у инкапсулатима сока од микробиља броколија. Што се тиче обојених јогурта, веће вредности укупних полифенола (TPC) имали су јогурти обogaћени инкапсулатима са инулином (**ЈО-АИН** и **ЈО-ЦИН**) у поређењу са онима са малтодекстрином. Генерално, сви обogaћени узорци јогурта су имали више TPC вредности од контролног узорка.
- Сви обogaћени јогурти су имали високе вредности за антиоксидативну активност, више од контроле. Антиоксидативност је одређена применом две методе, а резултати показују да су обogaћени узорци показали добру тенденцију редукције Fe³⁺ јона (FRP), као и добру активност хватања ABTS⁺• радикала.
- На основу резултата сензорног испитивања укупног квалитета добијених јогурта се може закључити да се просечне оцене за укупни квалитет крећу од 3,7 до 4,8, што указује на врло добар/одличан квалитет обogaћених јогурта. Највише просечне оцене су добијене за текстуру и изглед. У погледу теста за одређивање прихватљивости јогурта од стране потрошача, може се закључити да обogaћени јогурти имају високу укупну прихватљивост, при чему су се вредности кретале од 6,0 ("умерено ми се

свиђа") до 8,3 ("екстремно ми се свиђа"). Дакле, обогаћени јогурти су имали висок сензорни квалитет са добрим сензорним оценама оцењивача.

Генерално, свеобухватне анализе извршене у овој докторској дисертацији на микробиљу, соковима од микробиља, инкапсулатима и обогаћеним јогуртима могу помоћи у добијању детаљније слике о њиховим својствима и потенцијалној примени. Микробиље представља добар извор разних биоактивних компонената, у првом реду фенолних једињења, глукозинолата и пигмената беталаина. Хладно цеђени сокови од микробиља се могу користити у производњи високо-вредних напитака због високог садржаја биоактивних компонената, добре сензорне прихватљивости и ниског садржаја шећера. Инкапсулати од сокова микробиља представљају потенцијално функционалне адитиве због високог садржаја фенолних једињења и снажне антиоксидативне активности, док када се примене у кисело-млечним производима имају вишеструку улогу и то у побољшању физичко-хемијских и текстуралних својстава, без утицаја на сензорну прихватљивост. Додатно, будућа истраживања као наставак ове докторске дисертације обухватиће испитивање биодоступности биоактивних једињења из хладно цеђених сокова од микробиља, инкапсулата од сокова микробиља и обогаћених производа са инкапсулатима сокова од микробиља током *in vitro* гастроинтестиналне дигестије.

7. ЛИТЕРАТУРА

- Abaajeh, A. R., Kingston, C. E., & Harty, M. (2023). Environmental factors influencing the growth and pathogenicity of microgreens bound for the market: A review. In *Renewable Agriculture and Food Systems*, 38: e12. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/S174217052300008X>
- Abdallah, M.M.F. (2008). Seed sprouts, a Pharaoh's heritage to improve food quality. *Arab Universities Journal of Agricultural Sciences*, 16(2): 469-478. <https://doi.org/10.21608/ajs.2008.15018>
- Abdel-Aty, A. M., Barakat, A. Z., Bassuiny, R. I., & Mohamed, S. A. (2024). Chia gum-gelatin-based encapsulation of chia sprouts phenolic compounds enhanced storage stability, bioavailability, antioxidant, antidiabetic, and antibacterial properties. *Scientific Reports*, 14(1): 22023. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-71913-2>
- Acharya, J., Gautam, S., Neupane, P., & Niroula, A. (2021). Pigments, ascorbic acid, and total polyphenols content and antioxidant capacities of beet (*Beta vulgaris*) microgreens during growth. *International Journal of Food Properties*, 24(1): 1175–1186. <https://doi.org/10.1080/10942912.2021.1955924>
- Afinjuomo, F., Abdella, S., Youssef, S. H., Song, Y., & Garg, S. (2021). Inulin and its application in drug delivery. *Pharmaceuticals*, 14(9): 855. <https://doi.org/10.3390/ph14090855>
- Ahmad, I., Hao, M., Li, Y., Zhang, J., Ding, Y., & Lyu, F. (2022). Fortification of yogurt with bioactive functional foods and ingredients and associated challenges - A review. *Trends in Food Science and Technology* 129: 558–580. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2022.11.003>
- Akbas, E., Kilercioglu, M., Onder, O. N., Koker, A., Soyler, B., & Oztop, M. H. (2017). Wheatgrass juice to wheat grass powder: Encapsulation, physical and chemical characterization. *Journal of Functional Foods*, 28: 19–27. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2016.11.010>
- Aleksić, N., & Šušteršič, V. (2020). Analysis of application of aquaponic system as a model of the circular economy: A review. *Reciklaža i Odrzivi Razvoj*, 13(1): 73–86. <https://doi.org/10.5937/or2001073a>
- Ali, A. A. H. (2023). Overview of the vital roles of macro minerals in the human body. *Journal of Trace Elements and Minerals*, 4: 100076. <https://doi.org/10.1016/j.jtemin.2023.100076>
- Ali, N., Popović, V., Koutchma, T., Warriner, K., & Zhu, Y. (2020). Effect of thermal, high hydrostatic pressure, and ultraviolet-C processing on the microbial inactivation, vitamins, chlorophyll, antioxidants, enzyme activity, and color of wheatgrass juice. *Journal of Food Process Engineering*, 43 (1): e13036. <https://doi.org/10.1111/jfpe.13036>
- Allen, R. C., thank Kathryn Bard, I., Butzer, K., Domar, E., Engerman, S., Guppy, N., Kotwal, A., Lamberg-Karlovsky, C., Pearson, R., Rosenbluth, G., Scott, T., & Taylor, S. (1997). Agriculture and the Origins of the State in Ancient Egypt. *Explorations in Economic History*, 34 (2): 135–,154. <https://doi.org/10.1006/exeh.1997.0673>
- Alloggia, F. P., Bafumo, R. F., Ramirez, D. A., Maza, M. A., & Camargo, A. B. (2023). Brassicaceae microgreens: A novel and promissory source of sustainable bioactive compounds. *Current Research in Food Science*, 6: 100480. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.crfs.2023.100480>
- Alrifai, O., Mats, L., Liu, R., Hao, X., Marcone, M. F., & Tsao, R. (2021). Effect of combined light-emitting diodes on the accumulation of glucosinolates in Brassica microgreens. *Food Production, Processing and Nutrition*, 3(1): 30. <https://doi.org/10.1186/s43014-021-00072-y>

- Alu'datt, M. H., Alrosan, M., Gammoh, S., Tranchant, C. C., Alhamad, M. N., Rababah, T., Zghoul, R., Alzoubi, H., Ghatasheh, S., Ghazlan, K., & Tan, T. C. (2022). Encapsulation-based technologies for bioactive compounds and their application in the food industry: A roadmap for food-derived functional and health-promoting ingredients. *Food Bioscience*, 50: 101971. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2022.101971>
- Aly, T. A. A., Koutb, F. A., Farid, M., Fayed, S. A., Ahmed, A. M., & ELRahim, E. A. (2020). Biochemical and histopathological evaluation of radish microgreen and clover etiolated sprouts against diabetic mellitus rats. *European Journal of Pharmaceutical and Medical research*, 7 (2): 126-134. https://www.ejpmr.com/home/abstract_id/6241
- Aly, T. A. A., Mohamed, S. M., Khattab, M. S., Abido, A. M. M., Abdel-Rahim, E. A., Al-Farga, A., Sarpong, F., & Aqlan, F. (2023). Clover microgreen incorporation in diet-controlled diabetes and counteracted aflatoxicosis of rats. *Food Science and Nutrition*, 11(12): 7605–7617. <https://doi.org/10.1002/fsn3.3680>
- Amir Maqbool, M., Aslam, M., Akbar, W., & Iqbal, Z. (2017). Biological Importance of vitamins for human health: A review. *J. Agric. Basic Sci.*, 2(3). <http://www.jabsjournal.com/>
- Amjadi, S., Ebrahimi, A., Gholizadeh, S., & Hamishehkar, H. (2025). Encapsulation and delivery of natural preservatives. *Natural Preservatives for Food*, 109–126. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-95614-7.00006-5>
- Anu Bhushani, J., & Anandharamakrishnan, C. (2014). Electrospinning and electrospraying techniques: Potential food based applications. *Trends in Food Science and Technology*, 38(1): 21–33. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2014.03.004>
- Araujo-Díaz, S. B., Leyva-Porras, C., Aguirre-Bañuelos, P., Álvarez-Salas, C., & Saavedra-Leos, Z. (2017). Evaluation of the physical properties and conservation of the antioxidants content, employing inulin and maltodextrin in the spray drying of blueberry juice. *Carbohydrate Polymers*, 167: 317–325. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.03.065>
- Arenas-Jal, M., Suñé-Negre, J. M., & García-Montoya, E. (2020). An overview of microencapsulation in the food industry: opportunities, challenges, and innovations. *European Food Research and Technology*, 246: 1371–1382. <https://doi.org/10.1007/s00217-020-03496-x>
- Aslam, S., Khan, R. S., Maqsood, S., & Khalid, N. (2021). Application of nano/microencapsulated ingredients in drinks and beverages. *Application of Nano/Microencapsulated Ingredients in Food Products*, 6: 105–169. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815726-8.00003-9>
- Augustin, M. A., & Sanguansri, L. (2012). Challenges in developing delivery systems for food additives, nutraceuticals and dietary supplements. *Encapsulation Technologies and Delivery Systems for Food Ingredients and Nutraceuticals*, 19–48. <https://doi.org/10.1533/9780857095909.1.19>
- Azarashkan, Z., Motamedzadegan, A., Ghorbani-HasanSaraei, A., Biparva, P., & Rahaiee, S. (2022b). Investigation of the physicochemical, antioxidant, rheological, and sensory properties of ricotta cheese enriched with free and nano-encapsulated broccoli sprout extract. *Food Science & Nutrition*, 10(11): 4059–4072. <https://doi.org/10.1002/fsn3.3001>
- Azarashkan, Z., Motamedzadegan, A., Ghorbani-HasanSaraei, A., Rahaiee, S., & Biparva, P. (2022a). Improvement of the Stability and Release of Sulforaphane-enriched Broccoli Sprout Extract Nanoliposomes by Co-encapsulation into Basil Seed Gum. *Food and Bioprocess Technology*, 15(7): 1573–1587. <https://doi.org/10.1007/s11947-022-02826-z>
- Aztatzi-Rugiero, L., Granados-Balbuena, S. Y., Zainos-Cuapio, Y., Ocaranza-Sánchez, E., & Rojas-López, M. (2019). Analysis of the degradation of betanin obtained from beetroot using Fourier

- transform infrared spectroscopy. *Journal of Food Science and Technology*, 56(8): 3677–3686. <https://doi.org/10.1007/s13197-019-03826-2>
- Bafumo, R. F., Alloggia, F. P., Ramirez, D. A., Ferreyra, S., Perez, M. B., Fontana, A., Manucha, W., & Camargo, A. B. (2025). “Enhanced bioaccessibility of encapsulated red mizuna microgreens: A phytochemical profile approach.” *Food Bioscience*, 66: 106249. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2025.106249>
- Baker, K. A., Beecher, L., & Northcutt, J. K. (2019). Effect of irrigation water source and post-harvest washing treatment on the microflora of alfalfa and mung bean sprouts. *Food Control*, 100: 151–157. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2019.01.015>
- Bamidele, O. P., & Emmambux, M. N. (2021). Encapsulation of bioactive compounds by “extrusion” technologies: a review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 61(18): 3100–3118. <https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1793724>
- Bazaria, B., & Kumar, P. (2018). Optimization of spray drying parameters for beetroot juice powder using response surface methodology (RSM). *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 17(4): 408–415. <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2016.09.007>
- Beuk, S. (2020). Drugo lice jednog – telo kao distinkcija i sinteza u estetici vaskrslosti. *Kultura*, (167), 198–216. <https://doi.org/10.5937/kultura2067198B>
- Beig, S. U. R., & Shah, S. A. (2023). Adsorption of Cr(VI) by NaOH-modified microporous activated carbons derived from the wastes of *Amaranthus retroflexus*, *Magnolia soulangeana*, and *Tanacetum Vulgar L.*: mechanism, isotherms, and kinetic studies. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(13): 35808–35837. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-24616-y>
- Beirão-da-Costa, S., Duarte, C., Bourbon, A. I., Pinheiro, A. C., Januário, M. I. N., Vicente, A. A., Beirão-da-Costa, M. L., & Delgadillo, I. (2013). Inulin potential for encapsulation and controlled delivery of *Oregano* essential oil. *Food Hydrocolloids*, 33(2): 199–206. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2013.03.009>
- Bello, C., Maldini, M., Baima, S., Scaccini, C., & Natella, F. (2018). Glucoraphanin and sulforaphane evolution during juice preparation from broccoli sprouts. *Food Chemistry*, 268: 249–256. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.06.089>
- Benzie, I. F. F., & Strain, J. J. (1996). The Ferric Reducing Ability of Plasma (FRAP) as a Measure of “Antioxidant Power”: The FRAP Assay. *Analytical Biochemistry*, 239(1): 70–76. <https://doi.org/https://doi.org/10.1006/abio.1996.0292>
- Bhaswant, M., Shanmugam, D. K., Miyazawa, T., Abe, C., & Miyazawa, T. (2023). Microgreens—A Comprehensive Review of Bioactive Molecules and Health Benefits. *Molecules* 28(2):867. <https://doi.org/10.3390/molecules28020867>
- Bhatt, P., Sharma, S., Grover, K., Sharma, S., Dharni, K., & Dhatt, A. S. (2023). Optimization of Nutritional Composition, Bioactive Compounds and Antioxidant Activity in Broccoli (*Brassica oleracea*) Microgreen Sprinkler using Alternate Drying Techniques. *Asian Journal of Dairy and Food Research*, 1–8. <https://doi.org/10.18805/ajdfr.dr-1955>
- Biancaniello, M., Popović, V., Fernandez-Avila, C., Ros-Polski, V., & Koutchma, T. (2018). Feasibility of a novel industrial-scale treatment of green cold-pressed juices by uv-c light exposure. *Beverages*, 4(2):29. <https://doi.org/10.3390/beverages4020029>
- Brier, Bob, and Hoyt Hobbs (2008). *Daily Life of the Ancient Egyptians*, 2nd ed. Santa Barbara: Greenwood.

- Budavári, N., Pék, Z., Helyes, L., Takács, S., & Nemeskéri, E. (2024). An Overview on the Use of Artificial Lighting for Sustainable Lettuce and Microgreens Production in an Indoor Vertical Farming System. *Horticulturae*, 10(9): 938. <https://doi.org/10.3390/horticulturae10090938>
- Burgain, J., Gaiani, C., Linder, M., & Scher, J. (2011). Encapsulation of probiotic living cells: From laboratory scale to industrial applications. *Journal of Food Engineering*, 104(4): 467-483. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2010.12.031>
- Brand-Williams, W., Cuvelier, M. E., Berset, C. (1995): Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. *LWT - Food Science and Technology*, 28: 25–30. [https://doi.org/10.1016/S0023-6438\(95\)80008-5](https://doi.org/10.1016/S0023-6438(95)80008-5)
- Calderón-Oliver, M., & Ponce-Alquicira, E. (2022). The Role of Microencapsulation in Food Application. *Molecules*, 27(5): 1499. <https://doi.org/10.3390/molecules27051499>
- Caliskan, G., & Dirim, S. N. (2016). The effect of different drying processes and the amounts of maltodextrin addition on the powder properties of sumac extract powders. *Powder Technology*, 287: 308–314. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2015.10.019>
- Carmo, E. L. do, Teodoro, R. A. R., Félix, P. H. C., Fernandes, R. V. de B., Oliveira, É. R. de, Veiga, T. R. L. A., Borges, S. V., & Botrel, D. A. (2018). Stability of spray-dried beetroot extract using oligosaccharides and whey proteins. *Food Chemistry*, 249: 51–59. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.12.076>
- Carneiro, H. C. F., Tonon, R. V., Grosso, C. R. F., & Hubinger, M. D. (2013). Encapsulation efficiency and oxidative stability of flaxseed oil microencapsulated by spray drying using different combinations of wall materials. *Journal of Food Engineering*, 115(4): 443–451. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2012.03.033>
- Castellaneta, A., Losito, I., Cisternino, G., Leoni, B., Santamaria, P., Calvano, C., & Bianco, G. (2022). All Ion Fragmentation Analysis Enhances the Untargeted Profiling of Glucosinolates in Brassica Microgreens by Liquid Chromatography and High-Resolution Mass Spectrometry. *Journal of the American Society for Mass Spectrometry*, 33(11): 2108–2119. <https://doi.org/10.1021/jasms.2c00208>
- Castro Coelho, S., Nogueiro Estevinho, B., & Rocha, F. (2021). Encapsulation in food industry with emerging electrohydrodynamic techniques: Electrospinning and electrospraying – A review. *Food Chemistry*, 339: 127850. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127850>
- Cataldi, T. R., Rubino, A., Lelario, F., & Bufo, S. A. (2007). Naturally occurring glucosinolates in plant extracts of rocket salad (*Eruca sativa* L.) identified by liquid chromatography coupled with negative ion electrospray ionization and quadrupole ion-trap mass spectrometry. *Rapid Commun Mass Spectrom*, 21(14): 2374-2388. <https://doi.org/10.1002/rcm.3101>
- Celli, G. B., & Brooks, M. S.-L. (2017). Impact of extraction and processing conditions on betalains and comparison of properties with anthocyanins — A current review. *Food Research International*, 100: 501-509. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2016.08.034>
- Chalella Mazzocato, M., Thomazini, M., & Favaro-Trindade, C. S. (2019). Improving stability of vitamin B12 (Cyanocobalamin) using microencapsulation by spray chilling technique. *Food Research International*, 126: 108663. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2019.108663>
- Chartoumpekis, D. V., Ziros, P. G., Chen, J. G., Groopman, J. D., Kensler, T. W., & Sykiotis, G. P. (2019). Broccoli sprout beverage is safe for thyroid hormonal and autoimmune status: Results of a 12-week randomized trial. *Food Chem Toxicol*, 126: 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2019.02.004>

- Chandra, R.D., Prihastyanti, M.N.U. & Lukitasari, D.M. (2021). Effects of pH, High Pressure Processing, and Ultraviolet Light on Carotenoids, Chlorophylls, and Anthocyanins of Fresh Fruit and Vegetable Juices. *eFood*, 2 (3): 113-124. <https://doi.org/10.2991/efood.k.210630.001>
- Chatzigeorgiou, I., Ravani, M., Papadopoulos, D. K., Kelesidis, G., Giantsis, I. A., Tsaballa, A., Koukounaras, A., & Ntinis, G. K. (2024). Greenhouse production of baby leaf vegetables using rainbow trout wastewater in a high-tech vertical decoupled aquaponic system. *Frontiers in Horticulture*, 3: 1418447. <https://doi.org/10.3389/fhort.2024.1418447>
- Chebotarev, D., & Naumov, I. (2024). Development and research of the effectiveness of using an automated aquaponic system for home cultivation of microgreens. *BIO Web of Conferences*, 113: 01015. EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/bioconf/202411301015>
- Chen, H., Tong, X., Tan, L., & Kong, L. (2020). Consumers' acceptability and perceptions toward the consumption of hydroponically and soil grown broccoli microgreens. *Journal of Agriculture and Food Research*, 2: 100051. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2020.100051>
- Choe, U., Yu, L. L., & Wang, T. T. Y. (2018). The Science behind Microgreens as an Exciting New Food for the 21st Century. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 66(44): 11519–11530. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.8b03096>
- Chranioti, C., Nikoloudaki, A., & Tzia, C. (2015). Saffron and beetroot extracts encapsulated in maltodextrin, gum Arabic, modified starch and chitosan: Incorporation in a chewing gum system. *Carbohydrate Polymers*, 127: 252–263. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2015.03.049>
- Ciuta, F., Arghir, L. D., Tudor, C. A., & Lagunovschi-Luchian, V. (2020). Research on microgreens farming in vertical hydroponic system. *Journal of Horticulture, Forestry and Biotechnology*, 24(4): 7–34. www.journal-hfb.usab-tm.ro
- Comunian, T. A., & Favaro-Trindade, C. S. (2016). Microencapsulation using biopolymers as an alternative to produce food enhanced with phytosterols and omega-3 fatty acids: A review. *Food Hydrocolloids*, 61: 442–457. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2016.06.003>
- Costa, A. L. R., Willerth, S. M., de la Torre, L. G., & Han, S. W. (2022). Trends in hydrogel-based encapsulation technologies for advanced cell therapies applied to limb ischemia. *Materials Today Bio*, 13: 100221. <https://doi.org/10.1016/j.mtbio.2022.100221>
- Coy-Barrera, E. (2020). Analysis of betalains (betacyanins and betaxanthins). *Recent Advances in Natural Products Analysis*, 593–619. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816455-6.00017-2>
- da Silva Malheiros, P., Daroit, D. J., & Brandelli, A. (2010). Food applications of liposome-encapsulated antimicrobial peptides. *Trends in Food Science and Technology*, 21(6): 284-292. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2010.03.003>
- da Silva, L. G. S., Morelli, A. P., Pavan, I. C. B., Tavares, M. R., Pestana, N. F., Rostagno, M. A., Simabuco, F. M., & Bezerra, R. M. N. (2020). Protective effects of beet (*Beta vulgaris*) leaves extract against oxidative stress in endothelial cells in vitro. *Phytotherapy Research*, 34(6): 1385–1396. <https://doi.org/10.1002/ptr.6612>
- Daniel Daza, L., Fujita, A., Granato, D., Silvia Fávaro-Trindade, C., & Inés Genovese, M. (2017). Functional properties of encapsulated Cagaita (*Eugenia dysenterica* DC.) fruit extract. *Food Bioscience*, 18: 15–21. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2017.03.003>
- de Boer, F. Y., Imhof, A., & Velikov, K. P. (2019). Encapsulation of colorants by natural polymers for food applications. *Coloration Technology*, 135(3): 183-194. <https://doi.org/10.1111/cote.12393>

- de la Fuente, B., López-García, G., Mañez, V., Alegría, A., Barberá, R., & Cilla, A. (2019). Evaluation of the Bioaccessibility of Antioxidant Bioactive Compounds and Minerals of Four Genotypes of Brassicaceae Microgreens. *Foods*, 8(7): 250. <https://doi.org/10.3390/foods8070250>
- de la Fuente, B., López-García, G., Mañez, V., Alegría, A., Barberá, R., & Cilla, A. (2020). Antiproliferative Effect of Bioaccessible Fractions of Four Brassicaceae Microgreens on Human Colon Cancer Cells Linked to Their Phytochemical Composition. *Antioxidants*, 9(5): 368. <https://doi.org/10.3390/antiox9050368>
- Demir, K., Sarıkamış, G., & Çakırer Seyrek, G. (2023). Effect of LED lights on the growth, nutritional quality and glucosinolate content of broccoli, cabbage and radish microgreens. *Food Chemistry*, 401: 134088. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.134088>
- Dereje, B., Jacquier, J. C., Elliott-Kingston, C., Harty, M., & Harbourne, N. (2023). Brassicaceae Microgreens: Phytochemical Compositions, Influences of Growing Practices, Postharvest Technology, Health, and Food Applications. *ACS Food Science and Technology*, 3(6): 981–998. <https://doi.org/10.1021/acsfoodscitech.3c00040>
- Devi, R., Devi, T. S., Kuna, A., Reddy, M. V., Chary, D. S., & Babu, K. M. (2023). Formulation and Sensory Evaluation of Fenugreek Microgreens Incorporated Instant Chutney Powders. *Environment and Ecology*, 41(1B): 486–491.
- Dewangan, S., & Bhatia, A. K. (2023). Vitamins and metabolites. In *Handbook of Biomolecules: Fundamentals, Properties and Applications*, 119–131. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91684-4.00001-3>
- Di Bella, M. C., Toscano, S., Arena, D., Moreno, D. A., Romano, D., & Branca, F. (2021). Effects of growing cycle and genotype on the morphometric properties and glucosinolates amount and profile of sprouts, microgreens and baby leaves of broccoli (*Brassica oleracea* L. var. *italica* Plenck) and kale (*B. oleracea* L. var. *acephala* DC.). *Agronomy*, 11(9): 1685. <https://doi.org/10.3390/agronomy11091685>
- Di Gioia, F., De Bellis, P., Mininni, C., Santamaria, P., & Serio, F. (2017). Physicochemical, agronomical and microbiological evaluation of alternative growing media for the production of rapini (*Brassica rapa* L.) microgreens. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 97(4): 1212–1219. <https://doi.org/10.1002/jsfa.7852>
- Di Gioia, F., Hong, J. C., Pisani, C., Petropoulos, S. A., Bai, J., & Roskopf, E. N. (2023). Yield performance, mineral profile, and nitrate content in a selection of seventeen microgreen species. *Frontiers in Plant Science*, 14: 1220691. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1220691>
- Di Gioia, F., Renna, M., & Santamaria, P. (2017). Sprouts, Microgreens and “Baby Leaf” Vegetables. In: Yildiz, F., Wiley, R. (eds) *Minimally Processed Refrigerated Fruits and Vegetables*. Food Engineering Series, Springer, Boston, MA. 403–432. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-7018-6_11
- Dias, M. C., Pinto, D. C. G. A., & Silva, A. M. S. (2021). Plant Flavonoids: Chemical Characteristics and Biological Activity. *Molecules*, 26(17): 5377. <https://doi.org/10.3390/molecules26175377>
- Ding, J., Shi, C., & Weintrit, A. (2007). An Important Waypoint on Passage of Navigation History: Zheng He’s Sailing to West Ocean. *International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, 1(3): 285–293.
- Dobrosłavić, E., Cegledi, E., Robić, K., Elez Garofulić, I., Dragović-Uzelac, V., & Repajić, M. (2024). Encapsulation of Fennel Essential Oil in Calcium Alginate Microbeads via Electrostatic Extrusion. *Applied Sciences (Switzerland)*, 14(8): 3522. <https://doi.org/10.3390/app14083522>

- Domagała, J., Sady, M., Grega, T., & Bonczar, G. (2006). Rheological properties and texture of yoghurts when oat-maltodextrin is used as a fat substitute. *International Journal of Food Properties*, 9(1): 1–11. <https://doi.org/10.1080/10942910600588776>
- Dönmez, Ö., Mogol, B. A., & Gökmen, V. (2017). Syneresis and rheological behaviors of set yogurt containing green tea and green coffee powders. *Journal of Dairy Science*, 100(2): 901–907. <https://doi.org/10.3168/jds.2016-11262>
- Dorđević, V., Balanč, B., Belščak-Cvitanović, A., Lević, S., Trifković, K., Kalušević, A., Kostić, I., Komes, D., Bugarski, B., & Nedović, V. (2015). Trends in Encapsulation Technologies for Delivery of Food Bioactive Compounds. *Food Engineering Reviews*, 7(4): 452–490. <https://doi.org/10.1007/s12393-014-9106-7>
- Drosou, C. G., Krokida, M. K., & Biliaderis, C. G. (2017). Encapsulation of bioactive compounds through electrospinning/electrospraying and spray drying: A comparative assessment of food-related applications. *Drying Technology*, 35(2): 139–162. <https://doi.org/10.1080/07373937.2016.1162797>
- Drozdowska, M., Leszczyńska, T., Koronowicz, A., Piasna-Słupecka, E., & Dziadek, K. (2020). Comparative study of young shoots and the mature red headed cabbage as antioxidant food resources with antiproliferative effect on prostate cancer cells. *RSC Advances*, 10(70): 43021–43034. <https://doi.org/10.1039/d0ra07861a>
- Drozdowska, M., Leszczyńska, T., Piasna-Słupecka, E., Domagała, D., & Koronowicz, A. (2021). Young shoots and mature red cabbage inhibit proliferation and induce apoptosis of prostate cancer cell lines. *Applied Sciences*, 11(23), 11507. <https://doi.org/10.3390/app112311507>
- Du, M., Cheng, X., Qian, L., Huo, A., Chen, J., & Sun, Y. (2023). Extraction, Physicochemical Properties, Functional Activities and Applications of Inulin Polysaccharide: a Review. *Plant Foods for Human Nutrition*, 78(2): 243–252. <https://doi.org/10.1007/s11130-023-01066-6>
- Du, M., Xiao, Z., & Luo, Y. (2022). Advances and emerging trends in cultivation substrates for growing sprouts and microgreens toward safe and sustainable agriculture. *Current Opinion in Food Science*, 46: 100863. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2022.100863>
- Ebert, A. W. (2022). Sprouts and Microgreens-Novel Food Sources for Healthy Diets. *Plants (Basel, Switzerland)*, 11(4): 571. <https://doi.org/10.3390/plants11040571>
- El-Ramady, H., T. Alshaal, S. A. Shehata, É. Domokos-Szabolcsy, N. Elhawat, J. Prokisch M. Fári & L. Marton (2014). Plant Nutrition: From Liquid Medium to Micro-farm. In: Ozier-Lafontaine, H., Lesueur-Jannoyer, M. (Eds.), *Sustainable Agriculture Reviews*, 14 (pp. 449–508). Switzerland: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-06016-3_12
- Engelen, L., van der Bilt, A., Schipper, M., & Bosman, F. (2005). Oral size perception of particles: Effect of size, type, viscosity and method. *Journal of Texture Studies*, 36: 373–386.
- Fahey, J. W., Zalcmann, A. T., & Talalay, P. (2001). The chemical diversity and distribution of glucosinolates and isothiocyanates among plants. *Phytochemistry*, 56(1): 5–51. [https://doi.org/10.1016/S0031-9422\(00\)00316-2](https://doi.org/10.1016/S0031-9422(00)00316-2)
- Fangmeier, M., Lehn, D. N., Maciel, M. J., & Volken de Souza, C. F. (2019). Encapsulation of Bioactive Ingredients by Extrusion with Vibrating Technology: Advantages and Challenges. *Food and Bioprocess Technology*, 12(9): 1472–1486. <https://doi.org/10.1007/s11947-019-02326-7>
- Fasciolo, B., Awouda, A., Bruno, G., & Lombardi, F. (2023). A smart aeroponic system for sustainable indoor farming. *Procedia CIRP*, 116: 636–641. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2023.02.107>

- Fayezizadeh, M. R., Ansari, N. A., Sourestani, M. M., & Hasanuzzaman, M. (2023). Balancing Yield and Antioxidant Capacity in Basil Microgreens: An Exploration of Nutrient Solution Concentrations in a Floating System. *Agriculture*, 13(9): 1691. <https://doi.org/10.3390/agriculture13091691>
- Ferruzza, S., Natella, F., Ranaldi, G., Murgia, C., Rossi, C., Trošt, K., Mattivi, F., Nardini, M., Maldini, M., Giusti, A. M., Moneta, E., Scaccini, C., Sambuy, Y., Morelli, G., & Baima, S. (2016). Nutraceutical improvement increases the protective activity of broccoli sprout juice in a human intestinal cell model of gut inflammation. *Pharmaceuticals*, 9(3): 48. <https://doi.org/10.3390/ph9030048>
- Fitzpatrick, T. B., Basset, G. J., Borel, P., Carrari, F., DellaPenna, D., Fraser, P. D., Hellmann, H., Osorio, S., Rothan, C., Valpuesta, V., Caris-Veyrat, C., and Fernie, A. R. (2012). Vitamin deficiencies in humans: can plant sci-ence help?. *The Plant Cell*, 24(2): 395–414. <https://doi.org/10.1105/tpc.111.093120>
- Flores-Mancha, M. A., Ruíz-Gutiérrez, M. G., Rentería-Monterrubio, A. L., Sánchez-Vega, R., Juárez-Moya, J., Santellano-Estrada, E., & Chávez-Martínez, A. (2021). Stirred yogurt added with beetroot extracts as an antioxidant source: Rheological, sensory, and physicochemical characteristics. *Journal of Food Processing and Preservation*, 45(7):e15628. <https://doi.org/10.1111/jfpp.15628>
- Flores-Mancha, M. A., Ruíz-Gutiérrez, M. G., Sánchez-Vega, R., Santellano-Estrada, E., & Chávez-Martínez, A. (2020). Characterization of betabel extract (*Beta vulgaris*) encapsulated with maltodextrin and inulin. *Molecules*, 25(23): 5498. <https://doi.org/10.3390/molecules25235498>
- Flores-Mancha, M. A., Ruíz-Gutiérrez, M. G., Sánchez-Vega, R., Santellano-Estrada, E., & Chávez-Martínez, A. (2021). Effect of Encapsulated Beet Extracts (*Beta vulgaris*) Added to Yogurt on the Physicochemical Characteristics and Antioxidant Activity. *Molecules*, 26(16): 4768. <https://doi.org/10.3390/molecules26164768>
- Francenia Santos-Sánchez, N., Salas-Coronado, R., Villanueva-Cañongo, C., & Hernández-Carlos, B. (2019). Antioxidant Compounds and Their Antioxidant Mechanism. *IntechOpen*. <https://dx.doi.org/10.5772/intechopen.85270>
- Freitas, G. M., Cicotti, L., Constant, P. B. L., Zotarelli, M. F., de Sá, J. P. N., Mazzutti, S., de Oliveira, F. A., & Durigon, A. (2024). Beetroot Microgreens (*Beta vulgaris*) Powder Obtained by Cast-Tape Drying and Freeze-Drying. *Journal of Food Process Engineering*, 47(12): e70015. <https://doi.org/10.1111/jfpe.70015>
- Fu, F., & Hu, L. (2017). Temperature sensitive colour-changed composites. In M. Jawaid, M. S. Salit, & N. S. Abu Bakar (Eds.), *Advanced high strength natural fibre composites in construction* (pp. 405–423). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100411-1.00015-7>
- Gaćina, N. (2024). Alternative green wall materials: A new trend in spray drying encapsulation of polyphenols. *Croatian journal of food science and technology*, 16 (1): 56-63. <https://doi.org/10.17508/CJFST.2024.16.1.05>
- Galanakis, C. M. (Ed.) (2017). Introduction. *Nutraceutical and Functional Food Components: Effects of Innovative Processing Techniques* (pp. 1–14). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-805257-0.00001-6>
- Galieni, A., Falcinelli, B., Stagnari, F., Datti, A., & Benincasa, P. (2020). Sprouts and microgreens: Trends, opportunities, and horizons for novel research. *Agronomy* 10(9): 1424. <https://doi.org/10.3390/agronomy10091424>

- Gao, M., He, R., Shi, R., Zhang, Y., Song, S., Su, W., & Liu, H. (2021). Differential effects of low light intensity on broccoli microgreens growth and phytochemicals. *Agronomy*, 11(3): 537. <https://doi.org/10.3390/agronomy11030537>
- García-Pérez, P., Tomas, M., Rivera-Pérez, A., Patrone, V., Giuberti, G., Capanoglu, E., & Lucini, L. (2024). Exploring the bioaccessibility of polyphenols and glucosinolates from Brassicaceae microgreens by combining metabolomics profiling and computational chemometrics. *Food Chemistry*, 452: 139565. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.139565>
- Gawalek, J. (2021). Effect of spray dryer scale size on the properties of dried beetroot juice. *Molecules*, 26(21): 6700. <https://doi.org/10.3390/molecules26216700>
- Gerovac, J. R., Craver, J. K., Boldt, J. K., & Lopez, R. G. (2016). Light Intensity and Quality from Sole-source Light-emitting Diodes Impact Growth, Morphology, and Nutrient Content of Brassica Microgreens. *HortScience*, 51(5): 497-503. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.51.5.497>
- Gharsallaoui, A., Roudaut, G., Chambin, O., Voilley, A., & Saurel, R. (2007). Applications of spray-drying in microencapsulation of food ingredients: An overview. *Food Research International*, 40(9): 1107-1121. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2007.07.004>
- Ghoora, M. D., Babu, D. R., & Srividya, N. (2020). Nutrient composition, oxalate content and nutritional ranking of ten culinary microgreens. *Journal of Food Composition and Analysis*, 91: 103495. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2020.103495>
- Gomes, E. R., Carneiro, L. C. M., Stephani, R., Carvalho, A. F. de, Renhe, I. R. T., Wolfschoon-Pombo, A. F., & Perrone, Í. T. (2022). Effect of sugar reduction and addition of corn fibre and polydextrose on pore size and syneresis of yoghurt. *International Dairy Journal*, 129: 105298. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2021.105298>
- Gómez-Gaete, C., Avendaño-Godoy, J., Escobar-Avello, D., Campos-Requena, V.H., Rogel-Castillo, C., Estevinho, L.M., Martorell, M., Sharifi-Rad, J., Calina, D. (2024). Revolutionizing fruit juice: Exploring encapsulation techniques for bioactive compounds and their impact on nutrition, flavour and shelf life. *Food Production, Processing and Nutrition*, 6(1): 8. <https://doi.org/10.1186/s43014-023-00190-9>
- Goula, A. M., & Adamopoulos, K. G. (2010). A new technique for spray drying orange juice concentrate. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 11(2): 342-351. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2009.12.001>
- Guerrero, P., Kerry, J. P., & De La Caba, K. (2014). FTIR characterization of protein-polysaccharide interactions in extruded blends. *Carbohydrate Polymers*, 111: 598–605. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2014.05.005>
- Guerreiro, S. L. M., Cabral Júnior, J. F. G., Eiras, B. J. C. F., Miranda, B. d. S., Lopes, P. C. A., Melo, N. F. A. C. d., Luz, R. K., Sterzelecki, F. C., & Palheta, G. D. A. (2024). Integrating Aquaponics with *Macrobrachium amazonicum* (Palaemonidae: Decapoda) Cultivation for the Production of Microgreens: A Sustainable Approach. *AgriEngineering*, 6(3): 2718-2731. <https://doi.org/10.3390/agriengineering6030158>
- Gunjal, M., Khalangre, A., Singh, J., Kaur, S., Ercisli, S., Macit, E., & Rasane, P. (2025). Process optimization for microgreens-based dairy (lassi) beverage: Consumer acceptability, bioactive composition, and storage life using kinetic modelling. *Journal of Stored Products Research*, 112: 102596. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2025.102596>
- Gunjal, M., Singh, J., Kaur, J., Kaur, S., Nanda, V., Sharma, A., & Rasane, P. (2024). Microgreens: Cultivation practices, bioactive potential, health benefits, and opportunities for its utilization as value-added food. *Food Bioscience*, 62: 105133. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2024.105133>

- Guo, Q., Sun, Y., Tang, Q., Zhang, H., & Cheng, Z. (2020). Isolation, identification, biological estimation, and profiling of glucosinolates in *Isatis indigotica* roots. *Journal of Liquid Chromatography and Related Technologies*, 43(15–16): 645–656. <https://doi.org/10.1080/10826076.2020.1780605>
- Gyawali, R., & Ibrahim, S. A. (2016). Effects of hydrocolloids and processing conditions on acid whey production with reference to Greek yogurt. *Trends in Food Science & Technology*, 56: 61–76. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tifs.2016.07.013>
- Hanschen, F. S., Rohn, S., Mewis, I., Schreiner, M., & Kroh, L. W. (2012). Influence of the chemical structure on the thermal degradation of the glucosinolates in broccoli sprouts. *Food Chemistry*, 130(1): 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.05.109>
- Hernández-Adasme, C., Palma-Dias, R., & Escalona, V. H. (2023). The Effect of Light Intensity and Photoperiod on the Yield and Antioxidant Activity of Beet Microgreens Produced in an Indoor System. *Horticulturae*, 9(4): 493. <https://doi.org/10.3390/horticulturae9040493>
- Herrera López, M. A., Luna-Suárez, S., Delgado Macuil, R. J., & Rosas Cárdenas, F. de F. (2023). Simple and efficient protocol for amaranth betalains extraction and stability analysis by ATR-FTIR spectroscopy. *Journal of Cereal Science*, 113: 103745. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2023.103745>
- Hoyos-Leyva, J. D., Bello-Pérez, L. A., Alvarez-Ramirez, J., & Garcia, H. S. (2017). Microencapsulation using starch as wall material: A review. *Food Reviews International*, 34(2): 148–161. <https://doi.org/10.1080/87559129.2016.1261298>
- Huang, H., Jiang, X., Xiao, Z., Yu, L., Pham, Q., Sun, J., Chen, P., Yokoyama, W., Yu, L. L., Luo, Y. S., & Wang, T. T. Y. (2016). Red Cabbage Microgreens Lower Circulating Low-Density Lipoprotein (LDL), Liver Cholesterol, and Inflammatory Cytokines in Mice Fed a High-Fat Diet. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 64(48): 9161–9171. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.6b03805>
- Huang, Y., Stonehouse, A., & Abeykoon, C. (2023). Encapsulation methods for phase change materials – A critical review. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 200: 123458. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.123458>
- Hussain, E. A., Sadiq, Z., & Zia-Ul-Haq, M. (2018). *Betalains: Biomolecular aspects* (pp. 1–187). London: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-95624-4>
- Isayenkova, J., Wray, V., Nimtz, M., Strack, D., & Vogt, T. (2006). Cloning and functional characterisation of two regioselective flavonoid glucosyltransferases from *Beta vulgaris*. *Phytochemistry*, 67(15): 1598–1612. <https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2006.06.026>
- ISO 11136:2014. *Sensory Analysis—Methodology—General Guidance for Conducting Hedonic Tests with Consumers in a Controlled Area*. ISO: Genève, Switzerland, 2014. <https://www.iso.org/standard/50125.html>
- ISO 8586:2012. *Sensory Analysis—General Guidelines for the Selection, Training and Monitoring of Selected Assessors and Expert Sensory Assessors*. ISO: Genève, Switzerland, 2012. <https://www.iso.org/standard/45352.html>
- ISO 8589:2007. *Sensory Analysis—General Guidance for Design of Test Rooms*. ISO: Genève, Switzerland, 2007. <https://www.iso.org/standard/76667.html>
- Jahan, F., Bhuiyan, M. N. H., Islam, M. J., Ahmed, S., Hasan, M. S., Bashera, M. Al, Waliullah, M., Chowdhury, A. N., Islam, M. B., Saha, B. K., & Moulick, S. P. (2022). *Amaranthus tricolor* (red amaranth), an indigenous source of nutrients, minerals, amino acids, phytochemicals, and

- assessment of its antibacterial activity. *Journal of Agriculture and Food Research*, 10: 100419. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2022.100419>
- Jambor, T., Knizatova, N., Valkova, V., Tirpak, F., Greifova, H., Kovacik, A., & Lukac, N. (2022). Microgreens as functional component of the human diet: A review. *Journal of Microbiology, Biotechnology and Food Sciences*, 12(1): e5870. <https://doi.org/10.55251/jmbfs.5870>
- Janiszewska, E. (2014). Microencapsulated beetroot juice as a potential source of betalain. *Powder Technology*, 264: 190–196. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2014.05.032>
- Janiszewska, E., & Wlodarczyk, J. (2013). Influence of spray drying conditions on beetroot pigments retention after microencapsulation process. *Acta Agrophysica*, 20(2): 343-356. <https://www.researchgate.net/publication/239938149>
- Jayaraman, S., & Ramasamy, T. (2024). Metabolomics and bioactive attributes of fenugreek microgreens: Insights into antioxidant, antibacterial and antibiofilm potential. *Food Bioscience*, 60: 104316. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2024.104316>
- John, S., Gunathilake, S., Aluthge, S., Farahnaky, A., & Majzoobi, M. (2025). Unlocking the Potential of Chia Microgreen: Physicochemical Properties, Nutritional Profile and Its Application in Noodle Production. *Food and Bioprocess Technology*, 18: 5605–5620. <https://doi.org/10.1007/s11947-025-03792-y>
- Johnson, S. A., Prenni, J. E., Heuberger, A. L., Isweiri, H., Chaparro, J. M., Newman, S. E., Uchanski, M. E., Omerigic, H. M., Michell, K. A., Bunning, M., Foster, M. T., Thompson, H. J., & Weir, T. L. (2021). Comprehensive Evaluation of Metabolites and Minerals in 6 Microgreen Species and the Influence of Maturity, 5(2): nzaa180. <https://doi.org/10.1093/cdn/nzaa180>
- Jyothi, N. V. N., Prasanna, P. M., Sakarkar, S. N., Prabha, K. S., Ramaiah, P. S., & Srawan, G. Y. (2010). Microencapsulation techniques, factors influencing encapsulation efficiency. In *Journal of Microencapsulation*, 27 (3): 187–197. <https://doi.org/10.3109/02652040903131301>
- Kaimuangpak, K., Lehtonen, M., Rautio, J., & Weerapreeyakul, N. (2025). Unraveled cancer cell survival-associated amino acid metabolism of HepG2 cells altered by Thai rat-tailed radish microgreen extract examined by untargeted LC-MS/MS analysis. *Food Chemistry*, 474: 143206. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2025.143206>
- Kaimuangpak, K., Tamprasit, K., Thumanu, K., & Weerapreeyakul, N. (2022). Extracellular vesicles derived from microgreens of *Raphanus sativus* L. var. *caudatus* Alef contain bioactive macromolecules and inhibit HCT116 cells proliferation. *Scientific Reports*, 12(1): 15686. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-19950-7>
- Kalušević, A. (2017). Mikroinkapsulacija bioaktivnih jedinjenja iz sporednih proizvoda prehrambene industrije. Doktorska disertacija. Univerzitet u Beogradu – Poljoprivredni fakultet.
- Kalušević, A. M., Lević, S. M., Čalića, B. R., Milić, J. R., Pavlović, V. B., Bugarski, B. M., & Nedović, V. A. (2017). Effects of different carrier materials on physicochemical properties of microencapsulated grape skin extract. *Journal of Food Science and Technology*, 54(11): 3411–3420. <https://doi.org/10.1007/s13197-017-2790-6>
- Kamel, D. G., Hammam, A. R. A., Alsaleem, K. A., & Osman, D. M. (2021). Addition of inulin to probiotic yogurt: Viability of probiotic bacteria (*Bifidobacterium bifidum*) and sensory characteristics. *Food Science and Nutrition*, 9(3): 1743–1749. <https://doi.org/10.1002/fsn3.2154>
- Kanbargi, K. D., Sonawane, S. K., & Arya, S. S. (2017). Encapsulation characteristics of protein hydrolysate extracted from *Ziziphus jujube* seed. *International Journal of Food Properties*, 20(12): 3215–3224. <https://doi.org/10.1080/10942912.2017.1282516>

- Kandasamy, S., & Naveen, R. (2022). A review on the encapsulation of bioactive components using spray-drying and freeze-drying techniques. In *Journal of Food Process Engineering* 45(8): e14059. <https://doi.org/10.1111/jfpe.14059>
- Karasawa, M. M. G., & Mohan, C. (2018). Fruits as Prospective Reserves of bioactive Compounds: A Review. *Natural Products and Bioprospecting* 8(5): 335-346. <https://doi.org/10.1007/s13659-018-0186-6>
- Kaur, A., & Ghoshal, G. (2025). Encapsulation of Betalains Extracted from *Beta vulgaris* L. Pomace Powder Using Different Hydrocolloids and Its Characterization. *Food and Bioprocess Technology*, 18: 1968-1982. <https://doi.org/10.1007/s11947-024-03583-x>
- Kaur, N., Singh, B., & Kaur, A. (2022). Influence of wheatgrass and mung bean microgreens incorporation on physicochemical, textural, sensory, antioxidant properties and phenolic profile of gluten-free eggless rice muffins. *International Journal of Food Science and Technology*, 57(5): 3012–3020. <https://doi.org/10.1111/ijfs.15625>
- Khattab, M. S., Aly, T. A. A., Mohamed, S. M., Naguib, A. M. M., AL-Farga, A., & Abdel-Rahim, E. A. (2022). *Hordeum vulgare* L. microgreen mitigates reproductive dysfunction and oxidative stress in streptozotocin-induced diabetes and aflatoxicosis in male rats. *Food Science and Nutrition*, 10(10): 3355–3367. <https://doi.org/10.1002/fsn3.2936>
- Kim, T.-J., Seo, K.-H., Chon, J.-W., Youn, H.-Y., Kim, H.-J., Kim, Y.-S., Kim, B., Jeong, S.-Y., Jeong, D., & Song, K.-Y. (2022). Organoleptic Properties of Cow Milk, Yoghurt, Kefir, and Soy Milk When Combined with Broccoli Oil: A Preliminary Study. *Journal of Dairy Science and Biotechnology*, 40(2): 76–85. <https://doi.org/10.22424/jdsb.2022.40.2.76>
- Kizak, V., & Kapaligoz, S. (2019). Water quality changes and goldfish growth (*Carassius auratus*) in microgreen aquaponic and recirculating systems. *Fresenius Environ. Bull.*, 28(9): 6460-66. <https://www.researchgate.net/publication/339298953>
- Klopsch, R., Baldermann, S., Voss, A., Rohn, S., Schreiner, M., & Neugart, S. (2018). Bread enriched with legume microgreens and leaves-ontogenetic and baking-driven changes in the profile of secondary plant metabolites. *Frontiers in Chemistry*, 6:322. <https://doi.org/10.3389/fchem.2018.00322>
- Koç, G. Ç., & Dirim, S. N. (2018). Spray dried spinach juice: powder properties. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 12(3): 1654–1668. <https://doi.org/10.1007/s11694-018-9781-9>
- Kolarević, T., Milinčić, D. D., Vujović, T., Gašić, U. M., Prokić, L., Kostić, A. Ž., Cerović, R., Stanojević, S. P., Tešić, Ž. L., & Pešić, M. B. (2021). Phenolic Compounds and Antioxidant Properties of Field-Grown and In Vitro Leaves, and Calluses in Blackberry and Blueberry. *Horticulturae*, 7(11): 420. <https://doi.org/10.3390/horticulturae7110420>
- Kostić, A. Ž., Milinčić, D. D., Špirović Trifunović, B., Nedić, N., Gašić, U. M., Tešić, Ž. L., Stanojević, S. P., & Pešić, M. B. (2023). Monofloral Corn Poppy Bee-Collected Pollen—A Detailed Insight into Its Phytochemical Composition and Antioxidant Properties. *Antioxidants*, 12(7): 1424. <https://doi.org/10.3390/antiox12071424>
- Kou, L., Geng, P., Huang, H., Yang, T., Luo, Y., & Chen, P. (2015). Metabolomic assessment reveals an elevated level of glucosinolate content in CaCl₂ treated broccoli microgreens. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 63(6): 1863–1868. <https://doi.org/10.1021/jf504710r>
- Kumar, A., & Singh, N. (2024). Embracing nutritional, physical, pasting, textural, sensory and phenolic profile of functional muffins prepared by partial incorporation of lyophilized wheatgrass, fenugreek and basil microgreens juice powder. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 104(7): 4286–4295. <https://doi.org/10.1002/jsfa.13314>

- Kumar, S., & Pandey, A. K. (2013). Chemistry and biological activities of flavonoids: an overview. *The scientific world journal*, 2013(1): 162750. <https://doi.org/10.1155/2013/162750>
- Kumar, V., Sharma, A., Kohli, S. K., Bali, S., Sharma, M., Kumar, R., Bhardwaj, R., & Thukral, A. K. (2019). Differential distribution of polyphenols in plants using multivariate techniques. *Biotechnology Research and Innovation*, 3(1): 1–21. <https://doi.org/10.1016/j.biori.2019.03.001>
- Kussmann, M., Abe Cunha, D. H., & Berciano, S. (2023). Bioactive compounds for human and planetary health. *Frontiers in Nutrition*, 10: 1193848. <https://doi.org/10.3389/fnut.2023.1193848>
- Kyriacou, M. C., De Pascale, S., Kyrtatzis, A., & Roupheal, Y. (2017). Microgreens as a component of space life support systems: A cornucopia of functional food. *Frontiers in Plant Science*, 8: 1587. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01587>
- Kyriacou, M. C., El-Nakhel, C., Graziani, G., Pannico, A., Soteriou, G. A., Giordano, M., Ritieni, A., De Pascale, S., & Roupheal, Y. (2019). Functional quality in novel food sources: Genotypic variation in the nutritive and phytochemical composition of thirteen microgreens species. *Food Chemistry*, 277: 107–118. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.10.098>
- Kyriacou, M. C., Roupheal, Y., Di Gioia, F., Kyrtatzis, A., Serio, F., Renna, M., De Pascale, S., & Santamaria, P. (2016). Micro-scale vegetable production and the rise of microgreens. *Trends in Food Science and Technology*, 57: 103–115. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2016.09.005>
- Labuschagne, P. (2018). Impact of wall material physicochemical characteristics on the stability of encapsulated phytochemicals: A review. *Food Research International*, 107: 227–247. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.02.026>
- Lacerda, E. C. Q., Calado, V. M. D. A., Monteiro, M., Finotelli, P. V., Torres, A. G., & Perrone, D. (2016). Starch, inulin and maltodextrin as encapsulating agents affect the quality and stability of jussara pulp microparticles. *Carbohydrate Polymers*, 151: 500–510. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.05.093>
- Lan, T., Wang, J., Bao, S., Zhao, Q., Sun, X., Fang, Y., Ma, T., & Liu, S. (2023). Effects and impacts of technical processing units on the nutrients and functional components of fruit and vegetable juice. *Food Research International*, 168: 112784. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.112784>
- Largo Avila, E., Cortes Rodríguez, M., & Ciro Velásquez, H. J. (2015). Influence of maltodextrin and spray drying process conditions on sugarcane juice powder quality. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 68(1): 7509-7520. <https://doi.org/10.15446/rfnam.v68n1.47839>
- Lawless, H. T., & Heymann, H. (2010). *Sensory evaluation of food: Principles and practices* (2nd ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-6488-5>
- Le, T. N., Chiu, C. H., & Hsieh, P. C. (2020). Bioactive compounds and bioactivities of *Brassica oleracea* L. Var. *Italica* sprouts and microgreens: An updated overview from a nutraceutical perspective. *Plants*, 9(8): 946. <https://doi.org/10.3390/plants9080946>
- Le, T. N., Luong, H. Q., Li, H.-P., Chiu, C.-H., & Hsieh, P.-C. (2019). Broccoli (*Brassica oleracea* L. var. *italica*) Sprouts as the Potential Food Source for Bioactive Properties: A Comprehensive Study on In Vitro Disease Models. *Foods*, 8(11): 532. <https://doi.org/10.3390/foods8110532>
- Lee, S. G., Kim, J. H., Son, M. J., Lee, E. J., Park, W. D., Kim, J. B., Lee, S. P., & Lee, I. S. (2013). Influence of extraction method on quality and functionality of broccoli juice. *Preventive Nutrition and Food Science*, 18(2): 133–138. <https://doi.org/10.3746/pnf.2013.18.2.133>

- Lee, Y. K., Ahn, S. Il, & Kwak, H. S. (2013). Optimizing microencapsulation of peanut sprout extract by response surface methodology. *Food Hydrocolloids*, 30(1): 307–314. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2012.06.006>
- Lee, Y. K., Ganesan, P., Baharin, B. S., & Kwak, H. S. (2015). Characteristics, stability, and release of peanut sprout extracts in powdered microcapsules by spray drying. *Drying Technology*, 33(15–16): 1991–2001. <https://doi.org/10.1080/07373937.2014.951123>
- Leite Toneli, J. T. C., Mürr, F. E. X., Martinelli, P., Dal Fabbro, I. M., & Park, K. J. (2007). Optimization of a physical concentration process for inulin. *Journal of Food Engineering*, 80(3): 832–838. <https://doi.org/10.1016/j.foodeng.2006.07.012>
- Lekshmi, G. P., & Nair, B. R. (2020). Preparation, characterization and evaluation of a vitamin-enriched dietary supplement from *Vigna radiata* L. microgreens. *Nutrafoods*, 1: 159–168. <https://doi.org/10.17470/NF-020-0022>
- Lenzi, A., Orlandini, A., Bulgari, R., Ferrante, A., & Bruschi, P. (2019). Antioxidant and mineral composition of three wild leafy species: A comparison between microgreens and baby greens. *Foods*, 8(10): 487. <https://doi.org/10.3390/foods8100487>
- Lević, S. M. (2014). Inkapsulacija aroma u karnauba vosku, alginatu i polivinil-alkoholu. Doktorska disertacija. Univerzitet u Beogradu – Poljoprivredni fakultet.
- Li, H., Deng, Z., Liu, R., Zhu, H., Draves, J., Marcone, M., Sun, Y., & Tsao, R. (2015). Characterization of phenolics, betacyanins and antioxidant activities of the seed, leaf, sprout, flower and stalk extracts of three *Amaranthus* species. *Journal of Food Composition and Analysis*, 37: 75–81. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2014.09.003>
- Li, H., Xia, Y., Liu, H. Y., Guo, H., He, X. Q., Liu, Y., Wu, D. T., Mai, Y. H., Li, H. Bin, Zou, L., & Gan, R. Y. (2022). Nutritional values, beneficial effects, and food applications of broccoli (*Brassica oleracea* var. *italica* Plenck). *Trends in Food Science and Technology*, 119: 288–308. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.12.015>
- Li, W., Chen, H., Xu, B., Wang, Y., Zhang, C., Cao, Y., & Xing, X. (2023). Research progress on classification, sources and functions of dietary polyphenols for prevention and treatment of chronic diseases. *Journal of Future Foods*, 3(4): 289–305. <https://doi.org/10.1016/j.jfutfo.2023.03.001>
- Li, X., Tian, S., Wang, Y., Liu, J., Wang, J., & Lu, Y. (2021). Broccoli microgreens juice reduces body weight by enhancing insulin sensitivity and modulating gut microbiota in high-fat diet-induced C57BL/6J obese mice. *European Journal of Nutrition*, 60(7): 3829–3839. <https://doi.org/10.1007/s00394-021-02553-9>
- Lima, K. O., da Rocha, M., Alemán, A., López-Caballero, M. E., Tovar, C. A., Gómez-Guillén, M. C., Montero, P., & Prentice, C. (2021). Yogurt fortification by the addition of microencapsulated stripped weakfish (*Cynoscion guatucupa*) protein hydrolysate. *Antioxidants*, 10(10): 1567. <https://doi.org/10.3390/antiox10101567>
- Liu, Z., Shi, J., Wan, J., Pham, Q., Zhang, Z., Sun, J., Yu, L., Luo, Y., Wang, T. T. Y., & Chen, P. (2022). Profiling of Polyphenols and Glucosinolates in Kale and Broccoli Microgreens Grown under Chamber and Windowsill Conditions by Ultrahigh-Performance Liquid Chromatography High-Resolution Mass Spectrometry. *ACS Food Science and Technology*, 2(1): 101–113. <https://doi.org/10.1021/acsfoodscitech.1c00355>
- Lobiuc, A., Vasilache, V., Pintilie, O., Stoleru, T., Burducea, M., Oroian, M., & Zamfirache, M. M. (2017). Blue and red LED illumination improves growth and bioactive compounds contents in acyanic and cyanic ocimum *Basilicum* L. Microgreens. *Molecules*, 22(12): 2111. <https://doi.org/10.3390/molecules22122111>

- Lorizola, I. M., Furlan, C. P. B., Portovedo, M., Milanski, M., Botelho, P. B., Bezerra, R. M. N., Sumere, B. R., Rostagno, M. A., & Capitani, C. D. (2018). Beet stalks and leaves (*Beta vulgaris* L.) protect against high-fat diet-induced oxidative damage in the liver in mice. *Nutrients*, 10(7): 872. <https://doi.org/10.3390/nu10070872>
- Lourenço, S. C., Moldão-Martins, M., & Alves, V. D. (2020). Microencapsulation of pineapple peel extract by spray drying using maltodextrin, inulin, and Arabic gum as wall matrices. *Foods*, 9(6): 718. <https://doi.org/10.3390/FOODS9060718>
- Lu, W., Kelly, A. L., & Miao, S. (2016). Emulsion-based encapsulation and delivery systems for polyphenols. *Trends in Food Science and Technology*, 47: 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2015.10.015>
- Lu, Y., Dong, W., Alcazar, J., Yang, T., Luo, Y., Wang, Q., & Chen, P. (2018). Effect of preharvest CaCl₂ spray and postharvest UV-B radiation on storage quality of broccoli microgreens, a richer source of glucosinolates. *Journal of Food Composition and Analysis*, 67: 55–62. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2017.12.035>
- Lu, Y., Dong, W., Yang, T., Luo, Y., & Chen, P. (2021). Preharvest UVB application increases glucosinolate contents and enhances postharvest quality of broccoli microgreens. *Molecules*, 26(11): 3247. <https://doi.org/10.3390/molecules26113247>
- Lu, Z. H., & Cao, W. (2015). Vegetable seed sprouts. In Y. H. Hui & E. Ö. Evranuz (Eds.), *Handbook of vegetable preservation and processing* (2nd ed., pp. 649–670). CRC Press
- Łuczaj, Ł., & Pieroni, A. (2016). Nutritional ethnobotany in Europe: From emergency foods to healthy folk cuisines and contemporary foraging trends. In: Sánchez-Mata, M., Tardío, J. (Eds.), *Mediterranean Wild Edible Plants: Ethnobotany and Food Composition Tables*. (pp. 33–56). New York: Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-3329-7_3
- Lv, X., Wang, Q., Wang, X., Zheng, X., Fan, D., Espinoza-Pinochet, C. A., & Cespedes-Acuña, C. L. (2020). Selection and microencapsulation of myrosinase enzyme from broccoli sprouts of different varieties and characteristics evaluation. *Journal of Food Process Engineering*, 43(12): e13567. <https://doi.org/10.1111/jfpe.13567>
- Ma, S., Tian, S., Sun, J., Pang, X., Hu, Q., Li, X., & Lu, Y. (2022). Broccoli microgreens have hypoglycemic effect by improving blood lipid and inflammatory factors while modulating gut microbiota in mice with type 2 diabetes. *Journal of Food Biochemistry*, 46(7): e14145. <https://doi.org/10.1111/jfbc.14145>
- Machado, M. H., Almeida, A. da R., Maciel, M. V. de O. B., Vitorino, V. B., Bazzo, G. C., da Rosa, C. G., Sganzerla, W. G., Mendes, C., & Barreto, P. L. M. (2022). Microencapsulation by spray drying of red cabbage anthocyanin-rich extract for the production of a natural food colorant. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 39: 102287. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2022.102287>
- Mansouri, M., Noshad, M., Mehrnia, M. amin, & Hojjati, M. (2024). Sunflower microgreen powder as functional component to enhance the quality of gluten-free cakes. *LWT*, 198: 116049. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2024.116049>
- Marchioni, I., Martinelli, M., Ascrizzi, R., Gabbrielli, C., Flamini, G., Pistelli, L., & Pistelli, L. (2021). Small functional foods: Comparative phytochemical and nutritional analyses of five microgreens of the brassicaceae family. *Foods*, 10(2): 427. <https://doi.org/10.3390/foods10020427>
- Marcillo-Parra, V., Tupuna-Yerovi, D. S., González, Z., & Ruales, J. (2021). Encapsulation of bioactive compounds from fruit and vegetable by-products for food application – A review. *Trends in Food Science and Technology*, 116: 11-23. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.07.009>

Marković, J. (2025). Uticaj inkapsuliranog soka i liofilizovanog tropa korena i lista rena (*Armoracia rusticana* L.) na oksidativnu stabilnost i kvalitet majoneza tokom skladištenja. Doktorska disertacija. Univerzitet u Beogradu – Poljoprivredni fakultet.

Marković, J. M., Salević-Jelić, A. S., Milinčić, D. D., Gašić, U. M., Pavlović, V. B., Rabrenović, B. B., Pešić, M. B., Lević, S. M., Nedović, V. A., & Mihajlović, D. M. (2024). Encapsulated horseradish (*Armoracia rusticana* L.) root juice: Physicochemical characterization and the effects of its addition on the oxidative stability and quality of mayonnaise. *Journal of Food Engineering*, 381: 112189. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2024.112189>

Marković, J., Salević-Jelić, A., Milinčić, D., Gašić, U., Pavlović, V., Rabrenović, B., Pešić, M., Lević, S., Mihajlović, D., & Nedović, V. (2025). Horseradish (*Armoracia rusticana* L.) leaf juice encapsulated within polysaccharides-blend-based carriers: Characterization and application as potential antioxidants in mayonnaise production. *Food Chemistry*, 464: 141777. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.141777>

Marotti, I., Truzzi, F., Tibaldi, C., Negri, L., & Dinelli, G. (2021). Evaluation of licorice (*Glycyrrhiza glabra* L.) as a novel microgreen from the anti-inflammatory potential of polyphenols. *AIMS Agriculture and Food*, 6(1): 1–13. <https://doi.org/10.3934/agrfood.2021001>

Martínez-Ispizua, E., Calatayud, Á., Marsal, J. I., Cannata, C., Basile, F., Abdelkhalik, A., Soler, S., Valcárcel, J. V., & Martínez-Cuenca, M. R. (2022). The Nutritional Quality Potential of Microgreens, Baby Leaves, and Adult Lettuce: An Underexploited Nutraceutical Source. *Foods*, 11(3): 423. <https://doi.org/10.3390/foods11030423>

Martins, P. M. M., Batista, N. N., Santos, L. D., Dias, D. R., & Schwan, R. F. (2022). Microencapsulation by spray drying of coffee epiphytic yeasts *Saccharomyces cerevisiae* CCMA 0543 and *Torulaspora delbrueckii* CCMA 0684. *Brazilian Journal of Microbiology*, 53(3): 1565–1576. <https://doi.org/10.1007/s42770-022-00776-4>

Masabni, J., & Niu, G. (2022). Aquaponics. In T. Kozai, G. Niu, & M. Takagaki (Eds.), *Plant factory: Basics, applications and advances* (2nd ed., pp. 167–180). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85152-7.00017-3>

Masike, K., Mhlongo, M., Mudau, S., Nobela, O., Ncube, E., Tugizimana, F., George, M., & Madala, N. (2017). Highlighting mass spectrometric fragmentation differences and similarities between hydroxycinnamoyl-quinic acids and hydroxycinnamoyl-isocitric acids. *Chemistry Central Journal*, 11: 1–7. <https://doi.org/10.1186/s13065-017-0262-8>

Medouni-Adrar, S., Boulekbache-Makhlouf, L., Cadot, Y., Medouni-Haroune, L., Dahmoune, F., Makhoulkhe, A., & Madani, K. (2015). Optimization of the recovery of phenolic compounds from Algerian grape by-products. *Industrial Crops and Products*, 77, 123–132. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.08.039>

Menges, F. (2020). Spectragryph-optical spectroscopy software. Version, 1(5): 2016–2017.

Michalska-Ciechanowska, A., Majerska, J., Brzezowska, J., Wojdyło, A., & Figiel, A. (2020). The influence of maltodextrin and inulin on the physico-chemical properties of cranberry juice powders. *ChemEngineering*, 4(1): 12. <https://doi.org/10.3390/chemengineering4010012>

Michell, K. A., Isweiri, H., Newman, S. E., Bunning, M., Bellows, L. L., Dinges, M. M., Grabos, L. E., Rao, S., Foster, M. T., Heuberger, A. L., Prenni, J. E., Thompson, H. J., Uchanski, M. E., Weir, T. L., & Johnson, S. A. (2020). Microgreens: Consumer sensory perception and acceptance of an emerging functional food crop. *Journal of Food Science*, 85(4): 926–935. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.15075>

- Milinčić, D. D., Vidović, B. B., Gašić, U. M., Milenković, M., Kostić, A., Stanojević, S. P., Ilić, T., & Pešić, M. B. (2024). A systematic UHPLC Q-ToF MS approach for the characterization of bioactive compounds from freeze-dried red goji berries (*L. barbarum* L.) grown in Serbia: Phenolic compounds and phenylamides. *Food Chemistry*, 456: 140044. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.140044>
- Mir, S. A., Shah, M. A., & Mir, M. M. (2017). Microgreens: Production, shelf life, and bioactive components. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 57 (12): 2730-2736. <https://doi.org/10.1080/10408398.2016.1144557>
- Mishra, P., Mishra, S., & Mahanta, C. L. (2014). Effect of maltodextrin concentration and inlet temperature during spray drying on physicochemical and antioxidant properties of amla (*Embllica officinalis*) juice powder. *Food and Bioprocesses Processing*, 92(3): 252–258. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2013.08.003>
- Mohamed Ahmed, I. A., Alqah, H. A. S., Saleh, A., Al-Juhaimi, F. Y., Babiker, E. E., Ghafoor, K., Hassan, A. B., Osman, M. A., & Fickak, A. (2021). Physicochemical quality attributes and antioxidant properties of set-type yogurt fortified with argel (*Solenostemma argel* Hayne) leaf extract. *LWT*, 137: 110389. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110389>
- Mohamed, S. M., Abdel-Rahim, E. A., Aly, T. A. A., Naguib, A. M. M., & Khattab, M. S. (2022). Barley microgreen incorporation in diet-controlled diabetes and counteracted aflatoxicosis in rats. *Experimental Biology and Medicine*, 247(5): 385–394. <https://doi.org/10.1177/15353702211059765>
- Mohamed, S. M., Aly, T. A. A., Khattab, M. S., Abdel-Rahim, E. A., & AL-Farga, A. (2023). Pathological and biochemical evaluation of radish microgreen on diabetes and aflatoxicosis in rats. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(43): 98389–98399. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-29334-7>
- Mohammadi-Gouraji, E., Soleimanian-Zad, S., & Ghiaci, M. (2019). Phycocyanin-enriched yogurt and its antibacterial and physicochemical properties during 21 days of storage. *LWT*, 102: 230–236. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.09.057>
- Moon, J. K., Kim, J. R., Ahn, Y. J., & Shibamoto, T. (2010). Analysis and anti- helicobacter activity of sulforaphane and related compounds present in Broccoli (*Brassica oleracea* L.) sprouts. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 58(11): 6672–6677. <https://doi.org/10.1021/jf1003573>
- Moraru, P. I., Rusu, T., & Mintas, O. S. (2022). Trial Protocol for Evaluating Platforms for Growing Microgreens in Hydroponic Conditions. *Foods*, 11(9): 1327. <https://doi.org/10.3390/foods11091327>
- Mousavi Kalajahi, S. E., & Ghandiha, S. (2022). Optimization of spray drying parameters for encapsulation of Nettle (*Urtica dioica* L.) extract. *LWT*, 158: 113149. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.113149>
- Muzaffar, K., Dinkarrao, B. V., & Kumar, P. (2016). Optimization of spray drying conditions for production of quality pomegranate juice powder. *Cogent Food & Agriculture*, 2(1): 1127583. <https://doi.org/10.1080/23311932.2015.1127583>
- Nakakaawa, L., Gbala, I. D., Bargul, J. L., Cheseto, X., & Wesonga, J. M. (2025). Therapeutic Potential of *Brassica carinata* Microgreens Extract in Alleviating Symptoms of Type 2 Diabetes in Wistar Rats. *Food Science and Nutrition*, 13(1): e4635. <https://doi.org/10.1002/fsn3.4635>
- Nami, B., Tofighi, M., Molaveisi, M., Mahmoodan, A., & Dehnad, D. (2023). Gelatin-maltodextrin microcapsules as carriers of vitamin D3 improve textural properties of synbiotic yogurt and extend its probiotics survival. *Food Bioscience*, 53: 102524. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2023.102524>

- Nazeer, W. (1967). Egyptian Habits Between Yesterday and Today. pp. 31-32. Arabic Book Dar for Printing and Publication, Cairo
- Nedović, V., Kalušević, A., Manojlović, V., Lević, S., Bugarski, B. (2011). An overview of encapsulation technologies for food applications. *Procedia Food Science*, 1: 1806–1815. <https://doi.org/10.1016/j.profoo.2011.09.265>
- Nemzer, B., Pietrzkowski, Z., Spórna, A., Stalica, P., Thresher, W., Michałowski, T., & Wybraniec, S. (2011). Betalainic and nutritional profiles of pigment-enriched red beet root (*Beta vulgaris* L.) dried extracts. *Food Chemistry*, 127(1): 42–53. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.12.081>
- Newman, R. G., Moon, Y., Sams, C. E., Tou, J. C., & Waterland, N. L. (2021). Biofortification of Sodium Selenate Improves Dietary Mineral Contents and Antioxidant Capacity of Culinary Herb Microgreens. *Frontiers in Plant Science*, 12: 716437. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.716437>
- Nieder, R., Benbi, D. K., & Reichl, F. X. (Eds.) (2018). Microelements and their role in human health. In: Soil components and human health (pp. 317–374). Dordrecht: Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-024-1222-2_7
- Ninfali, P., Antonini, E., Frati, A., & Scarpa, E. (2017). C-Glycosyl Flavonoids from *Beta vulgaris* Cicla and Betalains from *Beta vulgaris* rubra: Antioxidant, Anticancer and Antiinflammatory Activities-A Review: Pharmacological Activities of Green and Red Beets. *Phytotherapy Research*, 31(6): 871-884. <https://doi.org/10.1002/ptr.5819>
- Nishad, J., Selvan, C. J., Mir, S. A., & Bosco, S. J. D. (2017). Effect of spray drying on physical properties of sugarcane juice powder (*Saccharum officinarum* L.). *Journal of Food Science and Technology*, 54(3): 687–697. <https://doi.org/10.1007/s13197-017-2507-x>
- Niu, G., & Masabni, J. (2022). Hydroponics. In T. Kozai, G. Niu, & M. Takagaki (Eds.), *Plant factory: Basics, applications and advances* (2nd ed., pp. 153–166). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85152-7.00023-9>
- Nivedha, V., & Lakshmy Priya, S. (2018). Comparative study of microgreens with mature greens incorporated ready-to-eat chutney powders. *International Journal of Food Science and Nutrition*, 3(6): 171-175. <https://www.foodsciencejournal.com>
- Ortega-Hernández, E., Camero-Maldonado, A. V., Acevedo-Pacheco, L., Jacobo-Velázquez, D. A., & Antunes-Ricardo, M. (2023). Immunomodulatory and Antioxidant Effects of Spray-Dried Encapsulated Kale Sprouts after In Vitro Gastrointestinal Digestion. *Foods*, 12(11): 2149. <https://doi.org/10.3390/foods12112149>
- Oxley, J. D. (2012). Spray cooling and spray chilling for food ingredient and nutraceutical encapsulation. In N. Garti & D. J. McClements (Eds.), *Encapsulation technologies and delivery systems for food ingredients and nutraceuticals* (pp. 110–130). Elsevier. <https://doi.org/10.1533/9780857095909.2.110>
- Özköse, A., Arslan, D., & Acar, A. (2016). The Comparison of the Chemical Composition, Sensory, Phenolic and Antioxidant Properties of Juices from Different Wheatgrass and Turfgrass Species. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 44(2): 499–507. <https://doi.org/10.15835/nbha44210405>
- Pan, L. H., Liu, F., Luo, S. Z., & Luo, J. ping. (2019). Pomegranate juice powder as sugar replacer enhanced quality and function of set yogurts: Structure, rheological property, antioxidant activity and in vitro bioaccessibility. *LWT*, 115: 108479. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.108479>

- Pandey, K. B., & Rizvi, S. I. (2009). Plant polyphenols as dietary antioxidants in human health and disease. *Oxidative medicine and cellular longevity*, 2(5): 270-278. <https://doi.org/10.4161/oxim.2.5.9498>
- Pannico, A., El-Nakhel, C., Graziani, G., Kyriacou, M. C., Giordano, M., Soteriou, G. A., Zarrelli, A., Ritieni, A., De Pascale, S., & Roupael, Y. (2020). Selenium biofortification impacts the nutritive value, polyphenolic content, and bioactive constitution of variable microgreens genotypes. *Antioxidants*, 9(4): 272. <https://doi.org/10.3390/antiox9040272>
- Pannico, A., Kyriacou, M. C., El-Nakhel, C., Graziani, G., Carillo, P., Corrado, G., Ritieni, A., Roupael, Y., & De Pascale, S. (2022). Hemp microgreens as an innovative functional food: Variation in the organic acids, amino acids, polyphenols, and cannabinoids composition of six hemp cultivars. *Food Research International*, 161: 111863. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.111863>
- Paradiso, V. M., Castellino, M., Renna, M., Gattullo, C. E., Calasso, M., Terzano, R., Allegretta, I., Leoni, B., Caponio, F., & Santamaria, P. (2018). Nutritional characterization and shelf-life of packaged microgreens. *Food and Function*, 9(11): 5629–5640. <https://doi.org/10.1039/c8fo01182f>
- Partap, M., Sharma, D., HN, D., Thakur, M., Verma, V., Ujala, & Bhargava, B. (2023). Microgreen: A tiny plant with superfood potential. *Journal of Functional Foods*, 107: 105697. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2023.105697>
- Pękal, A., & Pyrzynska, K. (2014). Evaluation of Aluminium Complexation Reaction for Flavonoid Content Assay. *Food Analytical Methods*, 7(9): 1776–1782. <https://doi.org/10.1007/s12161-014-9814-x>
- Petrović, M., Veljović, S., Tomić, N., Zlatanović, S., Tosti, T., Vukosavljević, P., & Gorjanović, S. (2021). Formulation of novel liqueurs from juice industry waste: Consumer acceptance, phenolic profile and preliminary monitoring of antioxidant activity and colour changes during storage. *Food Technology and Biotechnology*, 59(3): 282-294. <https://doi.org/10.17113/ftb.59.03.21.6759>
- Piasna-Słupecka, E., Leszczyńska, T., Drozdowska, M., Dziadek, K., Domagała, B., Domagała, D., & Koronowicz, A. (2023). Young Shoots of Red Beet and the Root at Full Maturity Inhibit Proliferation and Induce Apoptosis in Breast Cancer Cell Lines. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(8): 6889. <https://doi.org/10.3390/ijms24086889>
- Piñón-Balderrama, C. I., Leyva-Porras, C., Terán-Figueroa, Y., Espinosa-Solís, V., Álvarez-Salas, C., & Saavedra-Leos, M. Z. (2020). Encapsulation of active ingredients in food industry by spray-drying and nano spray-drying technologies. *Processes*, 8(8): 889. <https://doi.org/10.3390/PR8080889>
- Pinto, E., Almeida, A. A., Aguiar, A. A., & Ferreira, I. M. P. L. V. O. (2015). Comparison between the mineral profile and nitrate content of microgreens and mature lettuces. *Journal of Food Composition and Analysis*, 37: 38–43. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2014.06.018>
- Pinto, S. S., Fritzen-Freire, C. B., Dias, C. O., & Amboni, R. D. M. C. (2019). A potential technological application of probiotic microcapsules in lactose-free Greek-style yoghurt. *International Dairy Journal*, 97: 131–138. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2019.05.009>
- Pires, J. B., Santos, F. N. dos, Costa, I. H. de L., Kringel, D. H., Zavareze, E. da R., & Dias, A. R. G. (2023). Essential oil encapsulation by electrospinning and electrospraying using food proteins: A review. *Food Research International*, 170: 112970. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.112970>
- Pitalua, E., Jimenez, M., Vernon-Carter, E. J., & Beristain, C. I. (2010). Antioxidative activity of microcapsules with beetroot juice using gum Arabic as wall material. *Food and Bioprocess Processing*, 88(2–3): 253–258. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2010.01.002>

- Popescu, L., Cojocari, D., Ghendov-Mosanu, A., Lung, I., Soran, M. L., Opriş, O., Kacso, I., Ciorîţă, A., Balan, G., Pinte, A., & Sturza, R. (2023). The Effect of Aromatic Plant Extracts Encapsulated in Alginate on the Bioactivity, Textural Characteristics and Shelf Life of Yogurt. *Antioxidants*, 12(4): 893. <https://doi.org/10.3390/antiox12040893>
- Prakash, S. (2019). Study on the role of microgreens in human life. *International Journal of Chemical Studies*, 7(6): 419-421. <http://www.chemijournal.com>
- Price, T. (1988). Seed Sprout Production for Human Consumption-A Review. *Canadian Institute of Food Science and Technology Journal*, 21(1): 57-65. [https://doi.org/10.1016/S0315-5463\(88\)70718-X](https://doi.org/10.1016/S0315-5463(88)70718-X)
- Puccinelli, M., Pezzarossa, B., Pintimalli, L., Malorgio, F., Colla, G., & De Pascale, S. (2021). Selenium Biofortification of Three Wild Species, *Rumex acetosa* L., *Plantago coronopus* L., and *Portulaca oleracea* L., Grown as Microgreens. *Agronomy*, 11(6): 1155. <https://doi.org/10.3390/agronomy11061155>
- Pusty, K., Dash, K. K., Tiwari, A., & Balasubramaniam, V. M. (2023). Ultrasound assisted extraction of red cabbage and encapsulation by freeze-drying: moisture sorption isotherms and thermodynamic characteristics of encapsulate. *Food Science and Biotechnology*, 32(14): 2025–2042. <https://doi.org/10.1007/s10068-023-01302-4>
- Quelal, M., Villacrés, E., Vizuite, K., & Debut, A. (2023). Physicochemical characterization of sangorache natural colorant extracts (*Amaranthus quitensis* L.) prepared via spray and freeze-drying. *AIMS Agriculture and Food*, 8(2): 343–358. <https://doi.org/10.3934/AGRFOOD.2023019>
- Rahman, M.S. (Ed.). (2020). *Handbook of Food Preservation* (3rd ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780429091483>
- Rajalakshmi, M., Manoj, V. R., & Manoj, H. (2022). Comprehensive Review of Aquaponic, Hydroponic, and Recirculating Aquaculture Systems. *Journal of Experimental Biology and Agricultural Sciences*, 10(6): 1266–1289. [https://doi.org/10.18006/2022.10\(6\).1266.1289](https://doi.org/10.18006/2022.10(6).1266.1289)
- Raju, P. N., & Pal, D. (2014). Effect of dietary fibers on physico-chemical, sensory and textural properties of Misti Dahi. *Journal of Food Science and Technology*, 51(11): 3124–3133. <https://doi.org/10.1007/s13197-012-0849-y>
- Rani, S., Singh, N., Kaur, C., & Varghese, E. (2024). Measurement of phytochemical content and nutritional characteristics of microgreens grown in high altitude region of India. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 18(5): 3113–3127. <https://doi.org/10.1007/s11694-024-02390-4>
- Rao, A., Sharma, T., Kaushal, S., & . S. (2024). Micro-greens: The most impressive and evolving super-food of modern times. *International Journal of Research in Agronomy*, 7(11): 208–213. <https://doi.org/10.33545/2618060X.2024.v7.i11c.1963>
- Rashwan, A. K., Karim, N., Xu, Y., Cui, H., Fang, J., Cheng, K., Mo, J., & Chen, W. (2022). Chemical composition, quality attributes and antioxidant activity of stirred-type yogurt enriched with *Melastoma dodecandrum* Lour fruit powder. *Food and Function*, 13(3): 1579–1592. <https://doi.org/10.1039/d1fo03448k>
- Rashwan, A. K., Osman, A. I., & Chen, W. (2023). Natural nutraceuticals for enhancing yogurt properties: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 21(3): 1907–1931. <https://doi.org/10.1007/s10311-023-01588-0>
- Ravichandran, K., Palaniraj, R., Saw, N. M. M. T., Gabr, A. M. M., Ahmed, A. R., Knorr, D., & Smetanska, I. (2014). Effects of different encapsulation agents and drying process on stability of

- betalains extract. *Journal of Food Science and Technology*, 51(9): 2216–2221. <https://doi.org/10.1007/s13197-012-0728-6>
- Ray, S., Raychaudhuri, U., & Chakraborty, R. (2016). An overview of encapsulation of active compounds used in food products by drying technology. *Food Bioscience*, 13: 76–83. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2015.12.009>
- Renna, M., Di Gioia, F., Leoni, B., Mininni, C., & Santamaria, P. (2016). Culinary Assessment of Self-Produced Microgreens as Basic Ingredients in Sweet and Savory Dishes. *Journal of Culinary Science & Technology*, 15(2): 126–142. <https://doi.org/10.1080/15428052.2016.1225534>
- Re, R., Pellegrini, N., Proteggente, A., Pannala, A., Yang, M., & Rice-Evans, C. (1999). Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay. *Free Radical Biology and Medicine*, 26(9–10): 1231–1237. [https://doi.org/10.1016/S0891-5849\(98\)00315-3](https://doi.org/10.1016/S0891-5849(98)00315-3)
- Rezvanhah, A., Emam-Djomeh, Z., & Askari, G. (2019). Encapsulation and delivery of bioactive compounds using spray and freeze-drying techniques: A review. *Drying Technology*, 38(1–2): 235–258. <https://doi.org/10.1080/07373937.2019.1653906>
- Riggio, G. M., Wang, Q., Kniel, K. E., & Gibson, K. E. (2019). Microgreens—A review of food safety considerations along the farm to fork continuum. *International Journal of Food Microbiology*, 290: 76–85. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2018.09.027>
- Rizvi, A., Kumar, S., Satyanarayana, G. N. V., Ansari, N. G., & Saxena, S. (2025). Evaluation of growing conditions, organoleptic properties, antimicrobial activities and biochemical characterization of three culinary microgreens. *Food and Humanity*, 4: 100547. <https://doi.org/10.1016/j.foohum.2025.100547>
- Rizvi, A., Sharma, M., & Saxena, S. (2023). Microgreens: A Next Generation Nutraceutical for Multiple Disease Management and Health Promotion. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 70(2): 311–332. <https://doi.org/10.1007/s10722-022-01506-3>
- Rocchetti, G., Tomas, M., Zhang, L., Zengin, G., Lucini, L., & Capanoglu, E. (2020). Red beet (*Beta vulgaris*) and amaranth (*Amaranthus* sp.) microgreens: Effect of storage and in vitro gastrointestinal digestion on the untargeted metabolomic profile. *Food Chemistry*, 332: 127415. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127415>
- Rodsuwan, U., Thumthanaruk, B., Vatanyoopaisarn, S., Thisayakorn, K., Zhong, Q., Panjawanangkul, S., & Rungsardthong, V. (2024). Microencapsulation of gamma oryzanol using inulin as wall material by spray drying: optimization of formulation and characterization of microcapsules. *Journal of Food Science and Technology*, 61: 2177–2184. <https://doi.org/10.1007/s13197-024-05988-0>
- Rouphael, Y., Colla, G., & De Pascale, S. (2021). Sprouts, microgreens and edible flowers as novel functional foods. *Agronomy*, 11(12): 2568. <https://doi.org/10.3390/agronomy11122568>
- Saavedra-Leos, M. Z., Leyva-Porras, C., Martínez-Guerra, E., Pérez-García, S. A., Aguilar-Martínez, J. A., & Álvarez-Salas, C. (2014). Physical properties of inulin and inulin-orange juice: Physical characterization and technological application. *Carbohydrate Polymers*, 105(1): 10–19. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2013.12.079>
- Saavedra-Leos, M. Z., Leyva-Porras, C., Toxqui-Terán, A., & Espinosa-Solis, V. (2021). Physicochemical properties and antioxidant activity of spray-dry broccoli (*Brassica oleracea* var *Italica*) stalk and floret juice powders. *Molecules*, 26(7): 1973. <https://doi.org/10.3390/molecules26071973>

- Sadeghi, A. R., Pourahmad, R., & Mokhtare, M. (2017). Enrichment of probiotic yogurt with broccoli sprout extract and its effect on *Helicobacter pylori*. *Applied Food Biotechnology*, 4(1): 53–57. <https://doi.org/10.22037/afb.v4i1.13828>
- Saengha, W., Karirat, T., Buranrat, B., Matra, K., Deeseenthum, S., Katisart, T., & Luang-In, V. (2021). Cold Plasma Treatment on Mustard Green Seeds and its Effect on Growth, Isothiocyanates, Antioxidant Activity and Anticancer Activity of Microgreens. *International Journal of Agriculture and Biology*, 25(3): 667–676. <https://doi.org/10.17957/IJAB/15.1715>
- Şahin Nadeem, H., Torun, M., & Özdemir, F. (2011). Spray drying of the mountain tea (*Sideritis stricta*) water extract by using different hydrocolloid carriers. *LWT*, 44(7): 1626–1635. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2011.02.009>
- Saithalavi, K. M., Bhasin, A., & Yaqoob, M. (2021). Impact of sprouting on physicochemical and nutritional properties of sorghum: A review. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 15(5): 4190–4204. <https://doi.org/10.1007/s11694-021-00969-9>
- Salevic, A., Kalusevic, A., Levic, S., & Nedovic, V. (2018). Encapsulation of bioactive compounds derived from fruit processing by-products. *Journal of Agricultural Sciences, Belgrade*, 63(2): 113–137. <https://doi.org/10.2298/jas1802113s>
- Samuolienė, G., Brazaitytė, A., Viršilė, A., Miliuskienė, J., Vaštakaitė-Kairienė, V., & Duchovskis, P. (2019). Nutrient Levels in Brassicaceae Microgreens Increase Under Tailored Light-Emitting Diode Spectra. *Frontiers in Plant Science*, 10: 1475. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01475>
- Sanchez Maldonado, A. F., Schieber, A., & Gänzle, M. G. (2015). Plant defence mechanisms and enzymatic transformation products and their potential applications in food preservation: Advantages and limitations. *Trends in Food Science and Technology*, 46(1): 49–59. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2015.07.013>
- Santiago, L. G., & Castro, G. R. (2016). Novel technologies for the encapsulation of bioactive food compounds. *Current Opinion in Food Science*, 7: 78–85. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2016.01.006>
- Sarfarazi, M., & Mohebbi, M. (2020). An investigation into the crystalline structure, and the rheological, thermal, textural and sensory properties of sugar-free milk chocolate: effect of inulin and maltodextrin. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 14(3): 1568–1581. <https://doi.org/10.1007/s11694-020-00405-4>
- Sawicki, T., Martinez-Villaluenga, C., Frias, J., Wiczowski, W., Peñas, E., Bączek, N., & Zieliński, H. (2019). The effect of processing and in vitro digestion on the betalain profile and ACE inhibition activity of red beetroot products. *Journal of Functional Foods*, 55: 229–237. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2019.01.053>
- Senthilnathan, K., & Muthusamy, S. (2021). Process optimization & kinetic modeling study for fresh microgreen (*Alternanthera sessilis*) juice treated under thermosonication. *Preparative Biochemistry and Biotechnology*, 52(4): 433–442. <https://doi.org/10.1080/10826068.2021.1958345>
- Senthilnathan, K., & Muthusamy, S. (2022). Optimal process condition (UV-C): Quantitative findings on the mineral profile, bio-active profile, and changes in the quality attributes of fresh microgreen juice. *Journal of Food Processing and Preservation*, 46(8): e16780. <https://doi.org/10.1111/jfpp.16780>
- Šeregelj, V., Pezo, L., Šovljanski, O., Lević, S., Nedović, V., Markov, S., Tomić, A., Čanadanović-Brunet, J., Vulić, J., Šaponjac, V. T., & Četković, G. (2021). New concept of fortified yogurt formulation with encapsulated carrot waste extract. *LWT*, 138: 110732. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110732>

- Shahidi, F., & Han, X. Q. (1993). Encapsulation of Food Ingredients. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 33(6): 501–547. <https://doi.org/10.1080/10408399309527645>
- Shahril Efzueni, R. (2023). Effects of different growth media in hydroponic and aquaponic cultivation methods on biomass and phytochemical contents of radish microgreens (*Raphanus sativus* L.). In R. Sekeli, A. N. M. Roseli, N. Osman, T. F. Ying, R. Othman, L. E. Hai, N. L. Sukiran, N. M. C. Husin, S. H. Ahmad, S. A. Hassan, K. Khalid, M. H. Mansor, M. M. Yusoff, & P. E. M. Wahab (Eds.), *Transactions of the Malaysian Society of Plant Physiology, Proceedings of the 32nd Malaysian Society of Plant Physiology Conference (MSPPC 2022)*. Langkawi, Malaysia, pp. 255-260. <https://mspp.org.my>
- Shamlan, K. A., Yahya, H., Ismail, I. N. A., & Yahya, H. N. (2020). Antibacterial Activities of Microgreens and Mature Extract of Kale and Red Spinach Against Selected Pathogenic Bacteria. *East African Scholars Journal of Agriculture and Life Sciences*, 3(10): 337–342. <https://doi.org/10.36349/easjals.2020.v03i10.004>
- Sharma, A., Hazarika, M., Heisnam, P., Pandey, H., Devadas, V. S., Wangsu, M., & Kartha, B. D. (2023). Factors Affecting Production, Nutrient Translocation Mechanisms, and LED Emitted Light in Growth of Microgreen Plants in Soilless Culture. *ACS Agricultural Science and Technology*, 3(9): 701-719. <https://doi.org/10.1021/acsagscitech.3c00260>
- Sharma, A., Rasane, P., Dey, A., Singh, J., Kaur, S., Dhawan, K., Kumar, A., & Joshi, H. S. (2021). Optimization of a Process for a Microgreen and Fruit Based Ready to Serve Beverage. *International Journal of Food Studies*, 10(3): 41–56. <https://doi.org/10.7455/ijfs/10.si.2021.a4>
- Sharma, P., Sharma, A., Rasane, P., Dey, A., Choudhury, A., Singh, J., Kaur, S., Dhawan, K., & Kaur, D. (2020). Optimization of a process for microgreen and fruit-based functional beverage. *Anais Da Academia Brasileira De Ciências*, 92(3): e20190596. <https://doi.org/10.1590/0001-3765202020190596>
- Sharma, R., & Gupta, P. (2021). Nutraceutical potential of *Pennisetum typhoides* microgreens: In vitro evaluation of antioxidant and antibacterial activities and in silico *Staphylococcus aureus* FtsZ inhibition. *Food Bioscience*, 42: 101151. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2021.101151>
- Sharma, S., Shree, B., Sharma, D., Kumar, S., Kumar, V., Sharma, R., & Saini, R. (2022). Vegetable microgreens: The gleam of next generation super foods, their genetic enhancement, health benefits and processing approaches. *Food Research International*, 155: 111038. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.111038>
- Sharmila, G., Muthukumaran, C., Suriya, E., Muppudathi Keerthana, R., Kamatchi, M., Kumar, N. M., Anbarasan, T., & Jeyanthi, J. (2019). Ultrasound aided extraction of yellow pigment from *Tecoma castanifolia* floral petals: Optimization by response surface method and evaluation of the antioxidant activity. *Industrial Crops and Products*, 130: 467–477. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.01.008>
- Shen, N., Wang, T., Gan, Q., Liu, S., Wang, L., & Jin, B. (2022). Plant flavonoids: Classification, distribution, biosynthesis, and antioxidant activity. *Food Chemistry*, 383: 132531. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.132531>
- Shenoy, P., Xanthakis, E., Innings, F., Jonsson, C., Fitzpatrick, J., & Ahrné, L. (2015). Dry mixing of food powders: Effect of water content and composition on mixture quality of binary mixtures. *Journal of Food Engineering*, 149: 229–236. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2014.10.019>
- Sidi-Yacoub, B., Oudghiri, F., Belkadi, M., & Rodríguez-Barroso, R. (2019). Characterization of lignocellulosic components in exhausted sugar beet pulp waste by TG/FTIR analysis. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 138(2): 1801–1809. <https://doi.org/10.1007/s10973-019-08179-8>

- Silva, L., Morelli, A., Pavan, I., Tavares, M., Pestana, N., Rostagno, M., Simabuco, F., & Bezerra, R. (2020). Protective effects of beet (*Beta vulgaris*) leaves extract against oxidative stress in endothelial cells in vitro. *Phytotherapy Research*, 34: 1385–1396. <https://doi.org/10.1002/ptr.6612>
- Singh, A., Singh, J., Kaur, S., Gunjal, M., Kaur, J., Nanda, V., Ullah, R., Ercisli, S., & Rasane, P. (2024). Emergence of microgreens as a valuable food, current understanding of their market and consumer perception: A review. *Food Chemistry: X*, 23: 101527. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.101527>
- Singh, B., & Hathan, B. S. (2017). Process optimization of spray drying of beetroot Juice. *Journal of Food Science and Technology*, 54(8): 2241–2250. <https://doi.org/10.1007/s13197-017-2659-8>
- Singh, M., Nara, U., Rani, N., Pathak, D., Kaur, K., & Sangha, M. K. (2023). Comparison of Mineral Composition in Microgreens and Mature leaves of Celery (*Apium graveolens* L.). *Biological Trace Element Research*, 201(8): 4156–4166. <https://doi.org/10.1007/s12011-022-03483-1>
- Skoczylas, Ł., Korus, A., Tabaszewska, M., Gędoś, K., & Szczepańska, E. (2018). Evaluation of the quality of fresh and frozen wheatgrass juices depending on the time of grass harvest. *Journal of Food Processing and Preservation*, 42(1): e13401. <https://doi.org/10.1111/jfpp.13401>
- Sobel, R., Versic, R., & Gaonkar, A. G. (2014). Introduction to microencapsulation and controlled delivery in foods. In A. G. Gaonkar, N. Vasisht, A. R. Khare, & R. Sobel (Eds.), *Microencapsulation in the food industry* (pp. 3–12). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-404568-2.00001-7>
- Soliman, T. N., Mohammed, D. M., El-Messery, T. M., Elaaser, M., Zaky, A. A., Eun, J. B., Shim, J. H., & El-Said, M. M. (2022). Microencapsulation of Plant Phenolic Extracts Using Complex Coacervation Incorporated in Ultrafiltered Cheese Against AlCl₃-Induced Neuroinflammation in Rats. *Frontiers in Nutrition*, 9:929977. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.929977>
- Son, J. E., Kim, H. J., & Ahn, T. I. (2020). Hydroponic systems. In T. Kozai, G. Niu, & M. Takagaki (Eds.), *Plant factory* (2nd ed., pp. 273–283). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816691-8.00020-0>
- Sonawane, S. H., Bhanvase, B. A., Sivakumar, M., & Potdar, S. B. (Eds.) (2020). Current overview of encapsulation. In *Encapsulation of Active Molecules and Their Delivery System*. (pp. 1–8). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819363-1.00001-6>
- Srivastava, S., Bansal, M., Jain, D., & Srivastava, Y. (2022). Encapsulation for efficient spray drying of fruit juices with bioactive retention. In *Journal of Food Measurement and Characterization*, 16(5): 3792–3814. <https://doi.org/10.1007/s11694-022-01481-4>
- Stajčić, S., Četković, G., Tumbas Šaponjac, V., Travičić, V., Ilić, P., Brunet, S., & Tomić, A. (2024). Bioactive Compounds and the Antioxidant Activity of Selected Vegetable Microgreens: A Correlation Study. *Processes*, 12(8): 1743. <https://doi.org/10.3390/pr12081743>
- Steglich, W., & Strack, D. (1990). Betalains. In A. Brossi (Ed.), *The alkaloids: Chemistry and pharmacology*, 39: 1–62. Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S0099-9598\(08\)60163-7](https://doi.org/10.1016/S0099-9598(08)60163-7)
- Stintzing, F., Schieber, A., & Carle, R. (2003). Evaluation of colour properties and chemical quality parameters of cactus juices. *European Food Research and Technology*, 216: 303–311. <https://doi.org/10.1007/s00217-002-0657-0>
- Subedi, L., Cho, K., Park, Y. U., Choi, H. J., & Kim, S. Y. (2019). Sulforaphane-Enriched Broccoli Sprouts Pretreated by Pulsed Electric Fields Reduces Neuroinflammation and Ameliorates Scopolamine-Induced Amnesia in Mouse Brain through Its Antioxidant Ability via Nrf2-HO-1

- Activation. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*, 2019(1): 3549274. <https://doi.org/10.1155/2019/3549274>
- Suhag, R., Kellil, A., & Razem, M. (2024). Factors Influencing Food Powder Flowability. *Powders*, 3(1): 65–76. <https://doi.org/10.3390/powders3010006>
- Suheri, A., Widaningsih, S., & Awalia, U. F. (2024). E-agriculture of hydroponic farming with nutrient film technique (NFT) using internet of thing. *BIO Web of Conferences*, 146: 01022. <https://doi.org/10.1051/bioconf/202414601022>
- Sun, J., Kou, L., Geng, P., Huang, H., Yang, T., Luo, Y., & Chen, P. (2015). Metabolomic assessment reveals an elevated level of glucosinolate content in CaCl₂ treated broccoli microgreens. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 63(6): 1863–1868. <https://doi.org/10.1021/jf504710r>
- Sun, J., Xiao, Z., Lin, L. Z., Lester, G. E., Wang, Q., Harnly, J. M., & Chen, P. (2013). Profiling polyphenols in five *Brassica* species microgreens by UHPLC-PDA-ESI/HRMSn. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 61(46): 10960–10970. <https://doi.org/10.1021/jf401802n>
- Supapvanich, S., Sangsuk, P., Sripumimas, S., & Anuchai, J. (2020). Efficiency of low dose cyanocobalamin immersion on bioactive compounds contents of ready to eat sprouts (sunflower and daikon) and microgreens (red-amaranth) during storage. *Postharvest Biology and Technology*, 160: 111033. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2019.111033>
- Swami, S., Sawant, A., & Khandetod, Y. (2020). Microencapsulation techniques used for bioactive food ingredients: An overview. *The Pharma Innovation Journal*, 9(7): 40–49. www.thepharmajournal.com
- Szopa, A., Motyka, S., & Ekeirt, H. (2023). Chia sprouts and microgreens as a new nutraceutical raw materials and their health-promoting impact in modern dietetics. *Current Issues in Pharmacy and Medical Sciences*, 36(1): 33–44.
- Tan, L., Nuffer, H., Feng, J., Kwan, S. H., Chen, H., Tong, X., & Kong, L. (2020). Antioxidant properties and sensory evaluation of microgreens from commercial and local farms. *Food Science and Human Wellness*, 9(1): 45–51. <https://doi.org/10.1016/j.fshw.2019.12.002>
- Tan, M. X. L., & Danquah, M. K. (2012). Drug and Protein Encapsulation by Emulsification: Technology Enhancement Using Foam Formulations. *Chemical Engineering and Technology*, 35(4): 618–626. <https://doi.org/10.1002/ceat.201100358>
- Tekin, İ., Özcan, K., & Ersus, S. (2023). Optimization of ionic gelling encapsulation of red beet (*Beta vulgaris* L.) juice concentrate and stability of betalains. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 51: 102774. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2023.102774>
- Teng, J., Liao, P., & Wang, M. (2021). The role of emerging micro-scale vegetables in human diet and health benefits - An updated review based on microgreens. *Food and Function* 12(5): 1914–1932. <https://doi.org/10.1039/d0fo03299a>
- Teng, Z., Luo, Y., Pearlstein, D. J., Wheeler, R. M., Johnson, C. M., Wang, Q., & Fonseca, J. M. (2023). Microgreens for home, commercial, and space farming: a comprehensive update of the most recent developments. *Annual Review of Food Science and Technology*, 14(1): 539–562. <https://doi.org/10.1146/annurev-food-060721-024636>
- Thakur, N., Dhaliwal, H. S., & Sharma, V. (2019). Chemical Composition, Minerals and Vitamins Analysis of Lyophilized Wheatgrass Juice Powder. *International Journal on Emerging Technologies*, 10(4): 137–144. <https://www.researchgate.net/publication/340477392>

- Tian, G., Li, Y., Yuan, Q., Cheng, L., Kuang, P., & Tang, P. (2015). The stability and degradation kinetics of Sulforaphene in microcapsules based on several biopolymers via spray drying. *Carbohydrate Polymers*, 122: 5–10. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2015.01.003>
- Timilsena, Y. P., Akanbi, T. O., Khalid, N., Adhikari, B., & Barrow, C. J. (2019). Complex coacervation: Principles, mechanisms and applications in microencapsulation. *International Journal of Biological Macromolecules*, 121: 1276-1286. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.10.144>
- Timilsena, Y. P., Haque, Md. A., & Adhikari, B. (2020). Encapsulation in the Food Industry: A Brief Historical Overview to Recent Developments. *Food and Nutrition Sciences*, 11(6): 481–508. <https://doi.org/10.4236/fns.2020.116035>
- Todorović, A., Šturm, L., Salević-Jelić, A., Lević, S., Osojnik Črnivec, I. G., Prislan, I., Skrt, M., Bjeković, A., Poklar Ulrih, N., & Nedović, V. (2022). Encapsulation of Bilberry Extract with Maltodextrin and Gum Arabic by Freeze-Drying: Formulation, Characterisation, and Storage Stability. *Processes*, 10(10): 1991. <https://doi.org/10.3390/pr10101991>
- Tolun, A., Altintas, Z., & Artik, N. (2016). Microencapsulation of grape polyphenols using maltodextrin and gum arabic as two alternative coating materials: Development and characterization. *Journal of Biotechnology*, 239: 23–33. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2016.10.001>
- Tomas, M., Zhang, L., Zengin, G., Rocchetti, G., Capanoglu, E., & Lucini, L. (2021). Metabolomic insight into the profile, in vitro bioaccessibility and bioactive properties of polyphenols and glucosinolates from four Brassicaceae microgreens. *Food Research International*, 140: 110039. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.110039>
- Tomic, N., Djekic, I., Hofland, G., Smigic, N., Udovicki, B., & Rajkovic, A. (2020). Comparison of Supercritical CO₂-Drying, Freeze-Drying and Frying on Sensory Properties of Beetroot. *Foods*, 9(9): 1201. <https://doi.org/10.3390/foods9091201>
- Tomic, N., Dojnov, B., Miocinovic, J., Tomasevic, I., Smigic, N., Djekic, I., & Vujcic, Z. (2017). Enrichment of yoghurt with insoluble dietary fiber from triticale – A sensory perspective. *LWT*, 80: 59–66. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.02.008>
- Tomsone, L., Galoburda, R., Kruma, Z., Durrieu, V., & Cinkmanis, I. (2020). Microencapsulation of horseradish (*Armoracia rusticana* L.) juice using spray-drying. *Foods*, 9(9): 1332. <https://doi.org/10.3390/foods9091332>
- Tonon, R. V., Brabet, C., & Hubinger, M. D. (2008). Influence of process conditions on the physicochemical properties of açai (*Euterpe oleraceae* Mart.) powder produced by spray drying. *Journal of Food Engineering*, 88(3): 411–418. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2008.02.029>
- Tontul, I., & Topuz, A. (2017). Spray-drying of fruit and vegetable juices: Effect of drying conditions on the product yield and physical properties. *Trends in Food Science and Technology*, 63: 91-102. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.03.009>
- Truzzi, F., Whittaker, A., Roncuzzi, C., Saltari, A., Levesque, M. P., & Dinelli, G. (2021). Microgreens: Functional food with antiproliferative cancer properties influenced by light. *Foods*, 10(8): 1690. <https://doi.org/10.3390/foods10081690>
- Tsali, A., & Goula, A. M. (2018). Valorization of grape pomace: Encapsulation and storage stability of its phenolic extract. *Powder Technology*, 340: 194–207. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.09.011>
- Tsao, R. (2010). Chemistry and Biochemistry of Dietary Polyphenols. *Nutrients*, 2(12): 1231-1246. <https://doi.org/10.3390/nu2121231>

- Tumbas Šaponjac, V., Čanadanović-Brunet, J., Četković, G., Jakišić, M., Djilas, S., Vulić, J., & Stajčić, S. D. S. (2016). Encapsulation of beetroot pomace extract: RSM optimization, storage and gastrointestinal stability. *Molecules*, 21(5): 584. <https://doi.org/10.3390/molecules21050584>
- Vallejo, F., Tomás-Barberán, F., & Cristina, G.-V. (2002). Potential bioactive compounds in health promotion from broccoli cultivars grown in Spain. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 82: 1293–1297. <https://doi.org/10.1002/jsfa.1183>
- Verlinden, S. (2020). Microgreens: Definitions, product types, and production practices. In I. Warrington (Ed.), *Horticultural reviews*, 47: 85–124. Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119625407.ch3>
- Vučetić, A., Šovljanski, O., Pezo, L., Gligorijević, N., Kostić, S., Vulić, J., & Čanadanović-Brunet, J. (2025). A Comprehensive Antioxidant and Nutritional Profiling of Brassicaceae Microgreens. *Antioxidants*, 14(2): 191. <https://doi.org/10.3390/antiox14020191>
- Vuolo, M. M., Lima, V. S., & Maróstica Junior, M. R. (2019). Phenolic compounds: Structure, classification, and antioxidant power. In M. R. S. Campos (Ed.), *Bioactive compounds* (pp. 33–50). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814774-0.00002-5>
- Wadhawan, S., Tripathi, J., & Gautam, S. (2018). In vitro regulation of enzymatic release of glucose and its uptake by Fenugreek microgreen and Mint leaf extract. *International Journal of Food Science and Technology*, 53(2): 320–326. <https://doi.org/10.1111/ijfs.13588>
- Waliat, S., Arshad, M. S., Hanif, H., Ejaz, A., Khalid, W., Kauser, S., & Al-Farga, A. (2023). A review on bioactive compounds in sprouts: extraction techniques, food application and health functionality. *International Journal of Food Properties*, 26(1): 647–665. <https://doi.org/10.1080/10942912.2023.2176001>
- Wandrey, C., Bartkowiak, A., Harding, S. E. (2010). Materials for encapsulation. In N. J. Zuidam & V. A. Nedović (Eds.), *Encapsulation Technologies for Active Food Ingredients and Food Processing*. (pp. 31–100). New York: Springer
- Wijaya, P., Tallei, T. E., Tendean, L. E. N., Fatimawali, F., Turalaki, G. L. A., & Purwanto, D. S. (2025). Network Pharmacology Insights into Broccoli Microgreens for Prostate Cancer. *Heca Journal of Applied Sciences*, 3(1): 1–16. <https://doi.org/10.60084/hjas.v3i1.264>
- Wojdyło, A., Nowicka, P., Tkacz, K., & Turkiewicz, I. P. (2020). Sprouts vs. Microgreens as novel functional foods: Variation of nutritional and phytochemical profiles and their in vitro bioactive properties. *Molecules*, 25(20): 4648. <https://doi.org/10.3390/molecules25204648>
- Wootton-Beard, P. C., Moran, A., & Ryan, L. (2011). Stability of the total antioxidant capacity and total polyphenol content of 23 commercially available vegetable juices before and after in vitro digestion measured by FRAP, DPPH, ABTS and Folin-Ciocalteu methods. *Food Research International*, 44(1): 217–224. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2010.10.033>
- Wu, Y., Zou, L., Mao, J., Huang, J., & Liu, S. (2014). Stability and encapsulation efficiency of sulforaphane microencapsulated by spray drying. *Carbohydrate Polymers*, 102(1): 497–503. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2013.11.057>
- Xiao, Z., Codling, E. E., Luo, Y., Nou, X., Lester, G. E., & Wang, Q. (2016). Microgreens of Brassicaceae: Mineral composition and content of 30 varieties. *Journal of Food Composition and Analysis*, 49: 87–93. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2016.04.006>
- Xiao, Z., Lester, G. E., Luo, Y., & Wang, Q. (2012). Assessment of vitamin and carotenoid concentrations of emerging food products: Edible microgreens. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 60(31): 7644–7651. <https://doi.org/10.1021/jf300459b>

- Xiao, Z., Lester, G. E., Luo, Y., Xie, Z., Yu, L., & Wang, Q. (2014). Effect of light exposure on sensorial quality, concentrations of bioactive compounds and antioxidant capacity of radish microgreens during low temperature storage. *Food Chemistry*, 151: 472–479. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.11.086>
- Xiao, Z., Lester, G. E., Park, E., Saftner, R. A., Luo, Y., & Wang, Q. (2015). Evaluation and correlation of sensory attributes and chemical compositions of emerging fresh produce: Microgreens. *Postharvest Biology and Technology*, 110: 140–148. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2015.07.021>
- Xiao, Z., Luo, Y., Lester, G. E., Kou, L., Yang, T., & Wang, Q. (2014). Postharvest quality and shelf life of radish microgreens as impacted by storage temperature, packaging film, and chlorine wash treatment. *LWT - Food Science and Technology*, 55(2): 551–558. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2013.09.009>
- Xiao, Z., Rausch, S. R., Luo, Y., Sun, J., Yu, L., Wang, Q., Chen, P., Yu, L., & Stommel, J. R. (2019). Microgreens of Brassicaceae: Genetic diversity of phytochemical concentrations and antioxidant capacity. *LWT*, 101: 731–737. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.10.076>
- Xie, G. R., & Chen, H. J. (2021). Comprehensive Betalain Profiling of Djulis (*Chenopodium formosanum*) Cultivars Using HPLC-Q-Orbitrap High-Resolution Mass Spectrometry. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 69(51): 15699–15715. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.1c06596>
- Xu, Y., Yan, X., Zheng, H., Li, J., Wu, X., Xu, J., Zhen, Z., & Du, C. (2024). The application of encapsulation technology in the food Industry: Classifications, recent Advances, and perspectives. *Food Chemistry: X*, 21: 101240. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.101240>
- Yadav, K., Bajaj, R. K., Mandal, S., Saha, P., & Mann, B. (2018). Evaluation of total phenol content and antioxidant properties of encapsulated grape seed extract in yoghurt. *International Journal of Dairy Technology*, 71(1): 96–104. <https://doi.org/10.1111/1471-0307.12464>
- Yadav, L. P., Koley, T. K., Tripathi, A., & Singh, S. (2019). Antioxidant Potentiality and Mineral Content of Summer Season Leafy Greens: Comparison at Mature and Microgreen Stages Using Chemometric. *Agricultural Research*, 8(2): 165–175. <https://doi.org/10.1007/s40003-018-0378-7>
- Yang, W., Kaimainen, M., Järvenpää, E., Sandell, M., Huopalahti, R., Yang, B., & Laaksonen, O. (2021). Red beet (*Beta vulgaris*) betalains and grape (*Vitis vinifera*) anthocyanins as colorants in white currant juice – Effect of storage on degradation kinetics, color stability and sensory properties. *Food Chemistry*, 348: 128995. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128995>
- Yousefi, S., Kavyanirad, M., Aminifar, M., Weisany, W., & Mousavi Khaneghah, A. (2022). Yogurt fortification by microencapsulation of beetroot extract (*Beta vulgaris* L.) using maltodextrin, gum arabic, and whey protein isolate. *Food Science and Nutrition*, 10(6): 1875–1887. <https://doi.org/10.1002/fsn3.2804>
- Zanetti, M., Carniel, T. K., Dalcanton, F., dos Anjos, R. S., Gracher Riella, H., de Araújo, P. H. H., de Oliveira, D., & Antônio Fiori, M. (2018). Use of encapsulated natural compounds as antimicrobial additives in food packaging: A brief review. *Trends in Food Science and Technology*, 81: 51-60. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.09.003>
- Zbikowska, A., Szymańska, I., & Kowalska, M. (2020). Impact of inulin addition on properties of natural yogurt. *Applied Sciences*, 10(12): 4317. <https://doi.org/10.3390/app10124317>
- Zeng, W., Yang, J., Yan, G., & Zhu, Z. (2022). CaSO₄ Increases Yield and Alters the Nutritional Contents in Broccoli (*Brassica oleracea* L. Var. *italica*) Microgreens under NaCl Stress. *Foods*, 11(21): 3485. <https://doi.org/10.3390/foods11213485>

Zhang, X., Bian, Z., Yuan, X., Chen, X., & Lu, C. (2020). A review on the effects of light-emitting diode (LED) light on the nutrients of sprouts and microgreens. *Trends in Food Science and Technology*, 99: 203-216. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.02.031>

Zhang, Y., Xiao, Z., Ager, E., Kong, L., & Tan, L. (2021). Nutritional quality and health benefits of microgreens, a crop of modern agriculture. *Journal of Future Foods*, 1(1): 58-66. <https://doi.org/10.1016/j.jfutfo.2021.07.001>

Zhao, D., Li, Z., Xia, J., Kang, Y., Sun, P., Xiao, Z., & Niu, Y. (2023). Research progress of starch as microencapsulated wall material. *Carbohydrate Polymers*, 318: 121118. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2023.121118>

Zhishen, J., Mengcheng, T., & Jianming, W. (1999). The determination of flavonoid contents in mulberry and their scavenging effects on superoxide radicals. *Food Chemistry*, 64(4): 555–559. [https://doi.org/10.1016/S0308-8146\(98\)00102-2](https://doi.org/10.1016/S0308-8146(98)00102-2)

Zhong, Y., Xie, Y., Lyu, J., Xie, Y., Zhao, C., & Yu, J. (2025). Coriander microgreens and baby greens: Comparison of volatile and non-volatile metabolites and potential therapeutic effects on type 2 diabetes mellitus and obesity. *Food Research International*, 202: 115759. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2025.115759>

Zuidam, N. J., Shimon, E. (2010). Overview of microencapsulates for use in food products or processes and methods to make them. In: Zuidam, N.J., Nedovic, V.A (Eds.), *Encapsulation Technologies for Food Active Ingredients and Food Processing*. Springer, Dordrecht, pp. 3–29.

Библија, Свето Писмо Старог и Новог Завета (2018). Свети Архијерејски синод српске православне цркве. Београд: Свети Архијерејски синод српске православне цркве.

Правилник о општим и посебним условима хигијене хране и микробиолошким критеријумима за храну, Сл. гласник РС, бр. 30/2024.

Правилник о квалитету производа од млека и стартер култура, Сл. гласник РС, бр. 33/2010, 69/2010, 43/2013 - др. правилник и 34/2014.

<https://science.nasa.gov/science-research/science-enabling-technology/how-do-you-harvest-microgreens-in-microgravity/>, приступио: 20. Јун 2025. године.

8. ПРИЛОЗИ

Табела П1. Стандарди, једначине калибрационих крива и корелациони коефицијенти (R^2) који су коришћени за квантификацију фенолних једињења

Стандарди	$y=a*x+b$	R^2
Синапинска киселина	$y= 83605,5527 * x - 8503,3101$	0,9920
Апигенин	$y= 215501,5584 * x + 64892,2142$	0,9942

Табела П2. Класификација проточности и кохезивности инкапсулата на основу CI и HR вредности

CI (%)	Проточност
<15	Веома добра
15-20	Добра
20-35	Задовољавајућа
35-45	Лоша
>45	Веома лоша
HR	Кохезивност
<1,2	Ниска
1,2-1,4	Средња
>1,4	Висока

БИОГРАФИЈА АУТОРА

Белошевић Спасоје, рођен 17.02.1995. године у Истоку на Косову и Метохији јужној Српској покрајини, основно образовање као и Средњу медицинску школу завршио је у Београду. Основне академске студије на Пољопривредном факултету, студијски програм: Прехрамбена технологија - Управљање безбедношћу и квалитетом у производњи хране завршио је 2018. године са просечном оценом 9,66 чиме је заслужио награду факултета за једног од најбољих студената четврте године. Дипломским рад под називом „Примена индекса квалитета за оцену паприке сушене у атмосфери суперкритичног угљендиоксида“ одбранио је 27.09.2018. године са оценом 10. Исте године уписује и мастер академске студије смер Прехрамбена технологија. Мастер рад под називом "Утицај UV зрачења на одабрана својства квалитета кикирикија током вишемесечног периода складиштења" одбранио је 27.09.2019. године и то оценом 10, чиме је остварио укупни просек оцена на мастер академским студијама од 10 и стекао право на звање мастер инжењера технологије.

Добитник је стипендије за талентоване студенте коју додељује „Министарство просвете, науке и технолошког развоја“ за постигнут успех на свим годинама на основним академским студијама. Такође, добитник је стипендије "Задужбине Николе Спасића" за најбољег студента треће године на Пољопривредном факултету у Београду, као и награду коју додељује Пољопривредни факултет за једног од 10 најбољих студената Пољопривредног факултета. Добитник је стипендије „Доситеја“ коју додељује Министарство омладине и спорта Републике Србије за постигнут успех на основним и мастер академским студијама. Добитник је стипендије Министарства просвете, науке и технолошког развоја за студенте на докторским академским студијама.

Учествовао је у извођењу наставе и практичних вежби као студент демонстратор у више предмета на Пољопривредном факултету, укључујући: Сензорна анализа, Управљање квалитетом у производњи хране и Управљање безбедношћу у производњи хране. Школске 2019/2020. године уписао је докторске академске студије, такође на Пољопривредном факултету. Након избора у звање истраживач приправник започиње рад на Пољопривредном факултету, Универзитета у Београду, а затим изабран у звање истраживач сарадник. Аутор је ангажован на истраживањима у оквиру Уговора о реализацији и финансирању научноистраживачког рада који се спроводи између Пољопривредног факултета Универзитета у Београду и Министарства науке, технолошког развоја и иновација Републике Србије (евиденциони број уговора за 2025. годину: 451-03-137/2025-03/200116). Такође, учествује као истраживач на стратешком пројекту билатералне научне сарадње између Републике Србије и Народне Републике Кине за период 2024–2026. године. Јавно је излагао резултате свог научно истраживачког рада на међународним конференцијама. Такође, био је учесник у више одржаних међународних конференција у земљи и иностранству. Био је ментор студентима у такмичењу за екоиновативни производ под именом „Екотрофелија“. Учествовао је као рецензент у водећим међународним часописима, као што су: *Carbohydrate Polymers*, *Food Bioscience* и *Food Chemistry*. Учествовао је и пружао стручну помоћ у експерименталној реализацији дипломских, мастер и докторских радова.

Удруженим напорима са другим ауторима објавио је више публикација (27), укључујући 2 научна рада у врхунским међународним часописима (оба из категорије M21), 23 саопштења на међународним научним скуповима (катеорија M34), 1 предавање по позиву (катеорија M61) и 1 монографија од националног значаја (катеорија M42).

Изјава о ауторству

Име и презиме аутора: Спасоје Белошевић

Број индекса: ТН 190040

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом:

Добијање и инкапсулација сока од микробиља одабраних биљних врста

- резултат сопственог истраживачког рада;
- да дисертација у целини ни у деловима није била предложена за стицање друге дипломе према студијским програмима других високошколских установа;
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио/ла интелектуалну својину других лица.

Потпис аутора

У Београду, _____

Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора: Спасоје Белошевић

Број индекса: ТН 190040

Студијски програм: Прехрамбена технологија

Наслов рада: Добијање и инкапсулација сока од микробиља
одабраних биљних врста

Ментор: проф. др Виктор Недовић

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла ради похрањивања у **Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског назива доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

Потпис аутора

У Београду, _____

Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

Добијање и инкапсулација сока од микробиља одабраних биљних врста

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду и доступну у отвореном приступу могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство (CC BY)

2. Ауторство – некомерцијално (CC BY-NC)

③ Ауторство – некомерцијално – без прерада (CC BY-NC-ND)

4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима (CC BY-NC-SA)

5. Ауторство – без прерада (CC BY-ND)

6. Ауторство – делити под истим условима (CC BY-SA)

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци. Кратак опис лиценци је саставни део ове изјаве).

Потпис аутора

У Београду, _____

1. **Ауторство.** Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце, чак и у комерцијалне сврхе. Ово је најслободнија од свих лиценци.
2. **Ауторство – некомерцијално.** Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела.
3. **Ауторство – некомерцијално – без прерада.** Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела. У односу на све остале лиценце, овом лиценцом се ограничава највећи обим права коришћења дела.
4. **Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима.** Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада.
5. **Ауторство – без прерада.** Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела.
6. **Ауторство – делити под истим условима.** Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада. Слична је софтверским лиценцама, односно лиценцама отвореног кода.