

Latvijas Biozinātņu un tehnoloģiju universitāte
Latvia University of Life Sciences and Technologies

Lauksaimniecības un pārtikas tehnoloģijas fakultāte
Faculty of Agriculture and Food Technology



Mg.chem. **Sanita Vucāne**

**VIEDTĀLRUŅA ATTĒLU ANALĪZES UN
KOLORIMETRISKO METOŽU INTEGRĀCIJA AUGU
EĻĻU NOVĒRTĒŠANĀ**

***INTEGRATION OF SMARTPHONE IMAGE ANALYSIS AND
COLORIMETRIC METHODS IN THE EVALUATION OF
VEGETABLE OILS***

Promocijas darba KOPSAVILKUMS

zinātnes doktora grāda (Ph.D.) iegūšanai

SUMMARY

of the Doctoral thesis for the Doctoral degree of Science (*Ph.D.*)

Jelgava
2025

Promocijas darba vadītājs / *Scientific supervisor*

Dr.sc.ing. **Mārtiņš Šabovics** – Latvijas Biozinātņu un tehnoloģiju universitātes asociētais profesors, Starptautiskās sadarbības centra vadītājs / *associated professor, head of the International Cooperation Centre at Latvia University of Life Sciences and Technologies*

Darba recenzenti / *Official reviewers*

Dr.sc.ing. **Vitālijs Radenkovs** – Dārzkopības institūta vadošais pētnieks / *leading researcher at Institute of Horticulture*

Dr.chem. **Ilva Nakurte** – Vides risinājumu institūta vadošā pētniece / *leading researcher at Institute for Environmental Solutions*

Dr.sc.ing. **Laima Bērziņa** – Latvijas Biozinātņu un tehnoloģiju universitātes vadošā pētniece, asociētā profesore / *leading researcher, associated professor at Latvia University of Life Sciences and Technologies*

Promocijas darba aizstāvēšana notiks Latvijas Biozinātņu un tehnoloģiju universitātes Pārtikas un dzērienu tehnoloģijas nozares promocijas padomes atklātajā sēdē 10.09.2025. plkst. 14.00 Pārtikas institūta 216. auditorijā, Rīgas ielā 22a, Jelgavā.

Defence of doctoral thesis in an open session of the Promotion Board of the Food and Beverage Technology of Latvia University of Life Sciences and Technologies will be held on 10.09.2025. at 14.00 in room 216 of the Food Institute, Riga street 22a, Jelgava.

Ar promocijas darbu un tā kopsavilkumu var iepazīties Latvijas Biozinātņu un tehnoloģiju universitātes Fundamentālajā bibliotēkā, Lielajā ielā 2, Jelgavā un internetā (pieejams: <https://lbtufb.lbtu.lv/lv>). Atsauksmes sūtīt Pārtikas un dzērienu tehnoloģijas nozares promocijas padomes sekretārei asociētai profesorei Dr.sc.ing. **J. Zagorskai** (Rīgas iela 22a, Jelgava LV-3004, e-pasts jelena.zagorska@lbtu.lv).

The doctoral thesis is available at the Fundamental Library of the Latvia University of Life Sciences and Technologies, Liela Street 2, Jelgava, and online (<https://lbtufb.lbtu.lv/en>). References should be sent to associated professor Dr. sc. ing. J. Zagorska, secretary of the Promotion Board of the Food and Beverage Technology, Riga Street 22a, Jelgava, LV-3004, Latvia or e-mail: jelena.zagorska@lbtu.lv.

SATURS

PĒTĪJUMA AKTUALITĀTE	4
ZINĀTNISKĀ DARBA APROBĀCIJA	6
MATERIĀLI UN METODES	8
REZULTĀTI UN DISKUSIJA	13
1. Augu eļļu kvalitātes rādītāji	13
2. Optimālās distances noteikšana attēlu iegūšanai	14
3. Kolorimetriskā noteikšana, izmantojot	16
viedtālruņa attēlu analīzi	16
4. Augu eļļu fluorescences kolorimetriskā analīze	18
5. Radikāļu neitralizēšanas aktivitātes noteikšana	20
6. Kopējo fenolu satura noteikšana	24
7. Korelācijas matricas analīze, balstoties uz veikto analīžu rezultātiem	27
8. Algoritma izstrāde Python programmēšanas valodā	28
8.1. Python algoritms viedtālruņa attēlu analīzei kopējo fenolu satura noteikšanai augu eļļās	29
8.2. Python algoritms viedtālruņa attēlu analīzei radikāļu neitralizēšanas aktivitātes noteikšanai augu eļļās	30
9. Viedtālruņa lietotnes <i>DiColorimetry</i> funkcionālo iespēju novērtējums	30
SECINĀJUMI	31

CONTENT

TOPICALITY OF THE RESEARCH	33
APPROBATION OF THE RESEARCH WORK	35
MATERIALS AND METHODS	36
RESULTS AND DISCUSSION	39
1. Quality indicators of vegetable oils	39
2. Determining the optimal distance for image acquisition	39
3. Colorimetric determination using smartphone image analysis	41
4. Colorimetric analysis of vegetable oil fluorescence	42
5. Determination of radical scavenging activity	43
6. Determination of total phenolic content	47
7. Correlation Matrix Analysis Based on the Analytical Results	50
8. Development of an algorithm in the	50
Python programming language	50
8.1. Python algorithm for smartphone image analysis to determine the total phenolic content in vegetable oils	51
8.2. Python algorithm for smartphone image analysis to determine radical scavenging activity in vegetable oils	52
9. Evaluation of the functional capabilities of the <i>DiColorimetry</i> smartphone application	52
CONCLUSIONS	53

PĒTĪJUMA AKTUALITĀTE

Veselīga un droša pārtika ir viens no būtiskiem faktoriem, kas nodrošina cilvēku dzīves kvalitāti. Tādēļ dabas vielu izpēte un to lietošana praksē vienmēr ir bijusi nozīmīga tautsaimniecībā (Zeb, 2021). Eļļas kvalitātes novērtēšanai ražošanā vai pētniecībā tradicionāli tiek izmantotas klasiskās noteikšanas metodes, piemēram, spektrofotometrija. Tehnoloģiju attīstības rezultātā viedtālruņu izmantošana kļūst arvien pieejamāka un populārāka kā alternatīva ķīmiskajām analīzēm gan pārtikas, gan medicīnas nozarēs, piedāvājot plašākas un ērtākas iespējas analīžu veikšanai (Zeb, 2021; Hassanien, 2023). Viedtālruņa attēlu analīzes izmantošanai ķīmiskās analīzēs ir vairākas priekšrocības: 1) tas ir portatīvs, tāpēc to var izmantot dažādās vietās ārpus laboratorijas telpām; 2) tas var būt ekonomiski izdevīgāks, jo viedtālruņa iegādes izmaksas parasti ir zemākas nekā ķīmiskās analīzes iekārtām; 3) nav nepieciešami lieli izdevumi instrumenta apkopei un kalibrēšanai; 4) to ir viegli lietot un izmantot bez specializētu zināšanu prasībām, tādējādi tas papildina klasisko analīžu iekārtu un metožu klāstu (Bazani et al., 2021). Ņemot vērā augošo interesi par šādas tehnoloģijas pielietošanu analītiskā ķīmijā, šī metode var būt potenciāli noderīga arī kolorimetrisku augu eļļu īpašību izpētē. Augu eļļu krāsa ir cieši saistīta ar to antioksidantu īpašībām. Antioksidanti ir vielas, kas palīdz novērst vai samazināt oksidācijas procesus, kas ietekmē augu eļļu kvalitāti un uzglabāšanas laiku. Šie procesi var izraisīt sensoro īpašību izmaiņas, veidojot nepatīkamu aromātu un garšu, kā arī samazināt augu eļļas uzturvērtību. Daudzi antioksidanti, piemēram, karotinoīdi, tokoferoli, flavonoīdi un fenola savienojumi, ir pigmenti, kas tiešā veidā var ietekmēt šos procesus (Ramadan, 2020). Neskatoties uz iespējamām priekšrocībām, tomēr pastāv arī ierobežojumi, piemēram, viedtālruņu kamera un gaismas jutīgie sensori var ietekmēt analīzes precizitāti. Turklāt, jāņem vērā, ka tā ir relatīvi jauna metode, un tādēļ, vēl ir nepieciešams turpināt pētījumus un salīdzināt to rezultātus ar klasiskām analīzes metodēm (Nguyen et al., 2022).

Promocijas darba **hipotēze**: viedtālruņa attēlu analīze un kolorimetrisko metožu integrācija ir ilgtspējīga alternatīva klasiskajām optiskās analītiskās ķīmijas metodēm augu eļļu novērtēšanā.

Promocijas darba hipotēzi pierāda ar **aizstāvamām tēzēm**.

1. Optimāla viedtālruņa kameras attāluma noteikšana nodrošina RGB krāsu sistēmas vērtību atveidi un analīzi.
2. Izmantojot viedtālruņa attēlu analīzi, tiek nodrošināta augu eļļu kolorimetriska krāsu skaitļu noteikšana un fluorescences analīze.
3. Kolorimetriskā metode, kas balstīta uz viedtālruņa attēlu analīzi, izmantojot RGB krāsu sistēmu, nodrošina radikāļu neitralizēšanas aktivitāti un kopējo fenolu satura noteikšanu augu eļļās uzrādot salīdzināmus rezultātus ar UV/VIS spektrofotometriju.
4. Python programmēšanas valoda ir piemērota algoritmu izstrādei digitālo attēlu analīzei RGB krāsu sistēmā, nodrošinot automatizētu datu apstrādi un ļaujot izstrādātos risinājumus pielāgot izmantošanai viedtālruņa lietotnē.

Promocijas darba **mērķis**: izstrādāt un pārbaudīt metodiku viedtālrūņa attēlu analīzes un kolorimetrisko metožu integrācijai augu eļļu novērtēšanā.

Darba mērķa sasniegšanai izvirzīti šādi **uzdevumi**:

1. pētīt optimālo viedtālrūņa kameras attālumu RGB krāsu sistēmas vērtību iegūšanai un analīzei;
2. izstrādāt viedtālrūņa attēlu analīzes metodi kolorimetriskā krāsas skaitļa noteikšanai dažādu augu eļļu analīzei;
3. veikt augu eļļu fluorescences kolorimetrisko analīzi, izmantojot RGB un HSV krāsu sistēmas, pēc Toņa vērtībām;
4. salīdzināt viedtālrūņa attēlu analīzes un UV/VIS spektrofotometrijas rezultātus augu eļļu radikāļu neitralizēšanas aktivitātes noteikšanā, izmantojot RGB krāsu sistēmu;
5. novērtēt viedtālrūņa attēlu analīzes metodi kopējā fenolu satura noteikšanai augu eļļās, izmantojot RGB krāsu sistēmu, un salīdzināt iegūtos rezultātus ar UV/VIS spektrofotometrijas metodi;
6. izstrādāt un izmantot Python programmēšanas valodā veidotus algoritmus digitālo attēlu datu apstrādes un analīzes ātruma automatizēšanai, apvienojot vērtētās metodes vienotā sistēmā un nodrošinot to pielāgošanu viedtālrūņa lietotnei.

Darba **novitāte**:

1. pirmo reizi pētīta kolorimetrisko metožu integrācija radikāļu neitralizēšanas aktivitātes, kopējā fenolu satura, fluorescences kolorimetriskai analīzei un krāsas skaitļa noteikšanai augu eļļās, izmantojot viedtālrūņa attēlu analīzi;
2. Python programmēšanas valodā ir izstrādāti kopējo fenolu satura un radikāļu neitralizēšanas aktivitātes noteikšanas algoritmi, kas ir integrējami viedtālrūņa lietotnē *DiColorimetry*, un ir paredzēti digitālo attēlu kolorimetriskai analīzei RGB krāsu sistēmā.

Tautsaimnieciskā nozīme.

1. Viedtālrūņa attēlu analīzes metodes izmantošana augu eļļu novērtēšanā sekmē inovāciju attīstību, radot jaunus, efektīvākus risinājumus analītisko mērījumu veikšanai, veicina tehnoloģiju attīstību un pielietojumu dažādās ražošanas nozarēs.
2. Integrējot Python izstrādātu algoritmu augu eļļu kvalitātes kontrolē, laboratorijas var automatizēt datu iegūšanu un analīzi, kā arī uzlabot datu pārvaldību.
3. Viedtālrūņu kameras un to pielāgojamās programmatūras ļauj veikt attēlu analīzi RGB un HSV krāsu sistēmā, lai analizētu gan krāsu pigmentu, gan antioksidantu klātbūtni. Līdz šim veiktie pētījumi pārtikas matricās liecina par viedtālrūņu attēlu analīzes augsto precizitāti antioksidantu īpašību noteikšanā, salīdzinot ar klasiskajām metodēm, uzrādot labu linearitāti un precizitāti.

ZINĀTNISKĀ DARBA APROBĀCIJA

Pētījuma rezultāti apkopoti un publicēti 5 recenzētos zinātniskos izdevumos, kas indeksēti SCOPUS un / vai Web of Science datubāzēs.

1. **Vucane, S., Cinkmanis, I., Juhnevic-Radenkova, K., & Sabovics, M.** (2024). Revolutionizing Phenolic Content Determination in Vegetable Oils: A Cutting-Edge Approach Using Smartphone-Based Image Analysis. *Foods*, 2024, 13(11), 1700. DOI:10.3390/foods13111700
2. **Vucāne, S., Cinkmanis, I., Leitans, L. & Sabovics, M.** (2022). The authenticity of vegetable oil using smartphone-based image. *28th Annual International Scientific Conference "Research for Rural Development 2021". International Scientific Conference Proceedings*, Latvia University of Life Sciences and Technologies, Jelgava, 37, 122-128. DOI:10.22616/rrd.28.2022.018
3. **Vucane, S., Cinkmanis, I., & Sabovics, M.** (2022). Determination of total phenolic content in vegetable oils by smartphone-based image analysis. *Journal of Hygienic Engineering and Design*, 38, 199-203. UDC 665.3:547.56]:621.395.721.5
4. **Vucane, S., Cinkmanis, I., & Sabovics, M.** (2022). Colorimetric measurements of vegetable oils by smartphone-based image analysis. *Proceedings of the Latvian Academy of Sciences. Section B. Natural, Exact and Applied Sciences*, 76(1), 110-115. DOI:10.2478/prolas-2022-0017
5. **Vucane, S., Sabovics, M., Leitans, L., & Cinkmanis, I.** (2020). Smartphone-based colorimetric determination of DPPH free radical scavenging activity in vegetable oils. *Research for Rural Development 2020 : annual 26th International scientific conference proceedings*, Jelgava, Latvia, 13-15 May, Latvia University of Life Sciences and Technologies. Jelgava, 35, 106-111. DOI:10.22616/rrd.26.2020.016

Pētījuma rezultāti apkopoti un publicēti 1. zinātniskā izdevumā, kas nav indeksēts SCOPUS un/vai Web of Science datubāzēs.

Vucane, S., Cinkmanis, I., & Sabovics, M. (2021). Determination of biologically active compounds in vegetable oils by smartphone image analysis. *Līdzsvarota lauksaimniecība: zinātniski praktiskās konferences raksti*, Jelgava, Latvija, 25.-26.febr., 2021 / Latvijas Lauksaimniecības universitāte. Lauksaimniecības fakultāte. Latvijas Agronomu biedrība. Latvijas Lauksaimniecības un meža zinātņu akadēmija - Jelgava, 89-93.

Pētījuma rezultātā izstrādāti 2 algoritmi un 1 viedtālruna lietotne, kas reģistrēti Zenodo repozitorijā – zinātnes platformā, ko uztur CERN (Eiropas kodolpētījumu organizācija) sadarbībā ar OpenAIRE projekta ietvaros un ar Eiropas Komisijas atbalstu –, iegūstot digitālos objektu identifikatorus (DOI).

1. **Vucane**, S., Cinkmanis, I. & Cinkmanis H. (2025). DiColorimetry – A mobile application for colorimetric analysis of digital images from smartphones in chemical research. (Version 1.1) [Mobile application]. Zenodo, CERN. DOI: 10.5281/zenodo.15328506
2. **Vucane**, S., & Cinkmanis, I. (2025). Analysis of Smartphone Images for the Determination of Total Phenols in Vegetable Oils (Version 1.0) [Software(Algorithm)]. Zenodo, CERN. DOI:10.5281/zenodo.15225435
3. **Vucane**, S., & Cinkmanis, I. (2025). Determination of Radical Scavenging Activity in Vegetable Oils Using Smartphone Image Analysis in the RGB Color System (Version 1.0) [Software(Algorithm)]. Zenodo, CERN. DOI: 10.5281/zenodo.15229741

Par pētījuma rezultātiem ziņots 6 starptautiskās zinātniskajās un zinātniski praktiskajās konferencēs, kongresos un simpozijos Latvijā, Izraēlā, Šveicē, Maķedonijā.

1. **Vucane** S., Sabovics M., Cinkmanis I. (2021) Smartphone-based fluorescence analysis of vegetable oil. 35rd International Conference EFFoST, 1.-4.11.2021., Lousanne, Switzerland (E-referāts / *E-poster*).
2. **Vucane** S., Cinkmanis I., Sabovics M. (2021) Determination of total phenolic content in vegetable oils by smartphone-based image analysis. Food Quality and Safety, Health and Nutrition congress NUTRICON 2021, 9-11.06.2021, Ohrid, Macedonia (E-stenda referāts / *E-poster presentation*).
3. **Vucane** S., Cinkmanis I., Sabovics M. (2021) Bioloģiski aktīvu savienojumu noteikšana augu eļļās ar viedtālrunī iegūtu attēlu analīzi. Zinātniski praktiskā konferencē "Līdzsvarota lauksaimniecība 2021". 25 -26.02.2021, Jelgava, Latvija (E-stenda referāts / *E-poster presentation*).
4. **Vucane** S., Sabovics M., Cinkmanis I. (2020) Smartphone based colorimetric determination of total phenolic content in vegetable oils. 34rd International Conference EFFoST, 10.-12.11.2020, Israel, (E-stenda referāts / *E-poster presentation*).
5. **Vucane** S., Cinkmanis I., Sabovics M. (2020) Colorimetric measurements of vegetable oils by smartphone-based image analysis 3rd International Conference "Nutrition and Health", 9 – 11.12.2020 / University of Latvia. Latvia University of Life Sciences and Technologies. Riga Stradiņš University, Riga, Latvia (E-stenda referāts / *E-poster presentation*).
6. **Vucane** S., Sabovics M., Leitans L., Cinkmanis I. (2020) Smartphone-based colorimetric determination of DPPH free radical scavenging activity in vegetable oils Research for Rural Development 2020: Annual 26th International scientific conference, 13-15.05.2020 / Latvia University of Life Sciences and Technologies. Jelgava, Latvia (Ziņojums / *Report*).

Pētījuma rezultāti ir prezentēti starptautiskajās pārtikas rūpniecības izstādēs "Rīga Food 2020" un "Rīga Food 2021", izgudrojumu un inovāciju festivālā "MINOX Zemgale 2020", kā arī raksts par kopējā fenolu satura noteikšanu,

izmantojot viedtālruņa attēlu analīzi, ir publicēts starptautiskajā plašsaziņas portālā "Devdiscourse" 2024. gada 29. maijā ar nosaukumu: "Bringing Lab to Your Pocket: Smartphone-Based Method for Measuring Phenolic Compounds in Vegetable Oils"¹.

Promocijas darba izstrāde līdzfinansēta: Eiropas Sociālā fonda projekta "LLU akadēmiskā personāla pilnveidošana" Nr.8.2.2.0/18/A/014, LLU "Zinātniskās kapacitātes stiprināšana LLU". Projekts "Viedtālruņa izmantošana bioloģiski aktīvu savienojumu noteikšanai augu eļļās", Projekta Nr. 3.2.-10/126, Z46.

NACIONĀLAIS
ATTĪSTĪBAS
PLĀNS 2020



EIROPAS SAVIENĪBA
Eiropas Sociālais
fonds

IEGULDĪJUMS TAVĀ NĀKOTNĒ



Latvijas
Lauksaimniecības
universitāte

Zinātniskās kapacitātes stiprināšana LLU

MATERIĀLI UN METODES

Pētījuma laiks un vieta

Pētījums veikts Latvijā laikā no 2019. līdz 2025. gadam Latvijas Biozinātņu un tehnoloģiju universitātes (iepriekš Latvijas Lauksaimniecības universitātes) Pārtikas institūta (iepriekš Pārtikas tehnoloģijas fakultātes) laboratorijās un Zemkopības Ministrijas Valsts Augu Aizsardzības dienesta Agroķīmijas laboratorijā.

Pētījuma objekts – Latvijas mazumtirdzniecības vietās tika iegādātas 40 dažādas augu eļļas. Pētījumā izvēlētās augu eļļas un to raksturojums ir apkopots 1. tabulā.

1.tabula / Table 1

Pētījumā izmantoto augu eļļu paraugu raksturojums / *Characterization of vegetable oil samples used in the research*

Paraugs / Tips <i>Sample / Type</i>	Zīmols / <i>Brand</i>	Iepakojums / <i>Packaging</i>	Valsts / <i>Country</i>	Saīsinājums / <i>Abbreviation</i>
Smiltsērķšķu / auksti spiesta <i>Sea buckthorn / cold pressed</i>	Extra	Stikls / <i>Glass</i>	Latvija / <i>Latvia</i>	SE-LVA
	Estvita	Stikls / <i>Glass</i>	Igaunija / <i>Estonia</i>	SE-EST
	Dary Natury	Stikls / <i>Glass</i>	Polija / <i>Poland</i>	SE-POL
	Gustav Heess	Stikls / <i>Glass</i>	Vācija / <i>Germany</i>	SE-DEU

¹ Bringing Lab to Your Pocket....

<https://www.devdiscourse.com/article/technology/2953747-bringing-lab-to-your-pocket-smartphone-based-method-for-measuring-phenolic-compounds-in-vegetable-oils> : Resurss skatīts 2024. gada 15. augustā.

1. tabulas turpinājums / *Continuation of Table 1*

Paraugs / Tips Sample / Type	Zīmols / Brand	Iepakojums / Packaging	Valsts / Country	Saīsinājums / Abbreviation
Kaņepju / auksti spiestā <i>Hemp/cold pressed</i>	Spelta	Stikls / Glass	Latvija / Latvia	HE-LVA
	Bionaturalis	Stikls / Glass	Lietuva / Lithuania	HE-LTU
	Dary Natury	Stikls / Glass	Polija / Poland	HE-POL
	Bio Planète	Stikls / Glass	Vācija / Germany	HE-DEU
Kukurūzas / ekstrahēta <i>Corn seed / extracted</i>	Basso	Stikls / Glass	Itālija / Italy	CO-ITA
	Grapoila	Stikls / Glass	Ungārija / Hungary	CO-HUN
	Oleofarm	Stikls / Glass	Polija / Poland	CO-POL
	Golden Kings	Stikls / Glass	Ukraina / Ukraine	CO-UKR
Vīnogu / ekstrahēta <i>Grape / extracted</i>	Carapelli	Stikls / Glass	Itālija / Italy	GR-ITA
	Borges	Stikls / Glass	Spānija / Spain	GR-ESP
	Lesieur	Stikls / Glass	Francija / France	GR-FRA
	Gustav Heess	Stikls / Glass	Vācija / Germany	GR-DEU
Linsēklu eļļa / auksti spiestā <i>Linseed /cold pressed</i>	Iecavnieks	Stikls / Glass	Latvija / Latvia	LI-LVA
	Polskie Ziarno	Stikls / Glass	Polija / Poland	LI-POL
	Rapunzel	Stikls / Glass	Vācija / Germany	LI-DEU
	Goccia D'Oro	Stikls / Glass	Itālija / Italy	LI-ITA
Rapšu eļļa / auksti spiestā <i>Rapeseed / cold pressed</i>	Iecavnieks	Stikls / Glass	Latvija / Latvia	RA-LVA
	Polskie Ziarno	Stikls / Glass	Polija / Poland	RA-POL
	I Love Eco	Stikls / Glass	Zviedrija / Sweden	RA-SWE
	Bio Planète	Stikls / Glass	Vācija / Germany	RA-DEU
Olīveļļa / augstākā labuma “Ekstra Virgin” <i>Olive oil / highest quality “Extra Virgin”</i>	Goccia D'Oro	Stikls / Glass	Itālija / Italy	OL-ITA
	Borges	Stikls / Glass	Spānija / Spain	OL-ESP
	Gallo	Stikls / Glass	Portugāle / Portugal	OL-PRT
	3 SUNS	Stikls / Glass	Grieķija / Greece	OL-GRC
Mārdadža / auksti spiestā <i>Milk thistle/ cold pressed</i>	Extra	Stikls / Glass	Latvija / Latvia	MI-LVA
	Polskie Ziarno	Stikls / Glass	Polija / Poland	MI-POL
	FutuNatura	Stikls / Glass	Slovēnija / Slovenia	MI-SVN
	Bio Planète	Stikls / Glass	Vācija / Germany	MI-DEU
Rīsu kliju / ekstrahēta <i>Rice bran / extracted</i>	Olitalia	Stikls / Glass	Itālija / Italy	RI-ITA
	Gustav Heess	Stikls / Glass	Vācija / Germany	RI-DEU
	Sattvic	Stikls / Glass	Indija / India	RI-IND
	Ellyndale	Stikls / Glass	Amerikas Savienotās Valstis / United States	RI-USA
Saulespuķu / auksti spiestā <i>Sunflower / cold pressed</i>	Polskie Ziarno	Stikls / Glass	Polija / Poland	SU-POL
	Golden Kings	Stikls / Glass	Ukraina / Ukraine	SU-UKR
	Rapunzel	Stikls / Glass	Vācija / Germany	SU-DEU
	Olitalia	Stikls / Glass	Itālija / Italy	SU-ITA

Digitālo attēlu uzņemšanai RGB krāsu sistēmā izmantots Huawei P30 lite viedtālrunis (2019. gada modelis, Huawei Technologies Co. Ltd., Ķīna) ar Android operētājsistēmu.

Pētījuma struktūra

Pētījums veikts piecos posmos un galvenie posmi apkopoti 2. tabulā.

2. tabula / Table 2

Pētījuma posmi / Stages of the research

Posms / Stage	Apraksts / Description
I Posms / Stage I	Augu eļļu kvalitātes rādītāju noteikšana / <i>Determination of quality indicators in vegetable oils</i>
II Posms / Stage II	Optimālās distances noteikšana attēlu iegūšanai / <i>Determining the optimal distance for image acquisition</i>
III Posms / Stage III	Kolorimetrijas pētījumi, izmantojot viedtālrunī iegūtu attēlu analīzi / <i>Colorimetry studies using smartphone image analysis</i>
IV posms / Stage VI	Radikāļu neutralizēšanas aktivitātes un kopējo fenolu satura kolorimetriskā noteikšana, izmantojot viedtālruna attēlu analīzi / <i>Colorimetric determination of radical scavenging activities and total phenolic content using smartphone image analysis</i>
V posms / Stage V	Algoritma izstrāde Python programmēšanas valodā un tā integrācija viedtālruna lietotnē / <i>Development of algorithm in the Python programming language and its integration into a smartphone application</i>

Pētījuma I posmā - Augu eļļu kvalitātes rādītāju noteikšana – ir izvēlētas augu eļļas un to kvalitātes noteikšana. Pētījuma I posms ietver 2 soļus.

Posma 1. solī iegādātas Latvijā pieejamas augu eļļas mazumtirdzniecības tīklā, kuras nogādātas laboratorijā un uzglabātas aukstumā ($+3 \pm 1$ °C) līdz turpmākai analīzei.

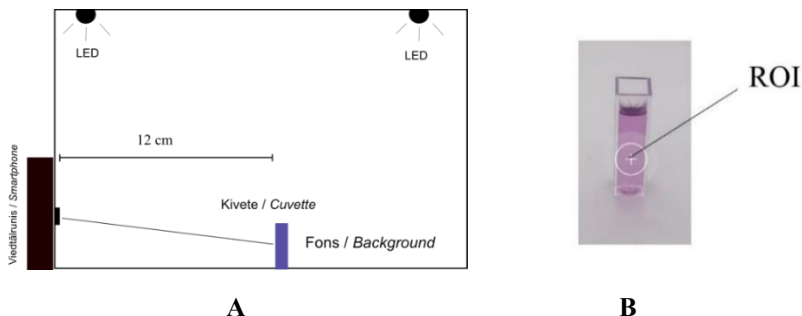
Posma 2. solī noteikti augu eļļu kvalitātes rādītāji pēc sekojošām metodēm - Dzīvnieku un augu eļļas skābes skaitļa noteikšana (LVS EN ISO 660:2020), Dzīvnieku un augu tauki un eļļas – Peroksīda skaitļa noteikšana un aktīvā skābekļa masas aprēķins (LVS EN ISO 3960:2017) un Dzīvnieku un augu tauki un eļļas – Joda skaitļa noteikšana (LVS EN ISO 3961:2018).

Lai noteiktu attālumu, kas ir nepieciešams viedtālruna attēlu iegūšanai, pētījuma **II posms - Optimālās distances noteikšana attēlu iegūšanai** - ietver 3.soļus.

Posma 1. solī pētījuma veikšanai izvēlēts Huawei P sērijas viedtālrunis P30 Lite, kas 2019. gadā ieguva labāko TechRadar Mobile Choice patērētāju balvu (TechRadar Mobile Choice Consumer Awards (MCCA)).

Posma 2. solī analīzes veikšanai mazumtirdzniecībā iegādāta polivinilhlorīda fotostudija Puluz (Photo Studio Box Puluz, Puluz Technology Ltd., Ķīna) ar atvērtu priekšējo daļu un šādiem izmēriem: 24 cm x 23 cm x 22 cm.

Posma 3. soli viedtālruna attēlu iegūšanai analizēm optimālās distances noteikšanai viedtālrunis Huawei P30 Lite tika novietots horizontāli atvērtās puses fotostudijas korpusa priekšā 9, 10, 11, 12, 13, 14 un 15 cm attālumā no 2.5 mL vienreizējās lietošanas makro kivetēm (BrandTech Scientific, Inc., ASV) ar kalibrācijas šķīdumiem, salīdzināšanas šķīdumu un augu eļļas paraugiem. Kolorimetriskā analīze veikta saskaņā ar 1. attēlu.



1. att. (A) Fotostudijas un viedtālruna novietošanas ilustrācija kolorimetriskai attēlu iegūšanai; (B) analīzes interesējošā reģiona (ROI) jeb noteikšanas reģiona piemērs no iegūtā attēla / Fig. 1. (A) Illustration of the placement of a photo studio and a smartphone for colorimetric image acquisition; (B) an example of the region of interest (ROI) or detection region from the obtained image

Lai veiktu kolorimetrijas pētījumus, kas nepieciešami viedtālruna attēlu iegūšanai, pētījuma III posms - Kolorimetrijas pētījumi izmantojot viedtālruna attēlu analīzi - ietver 2 soļus.

Posma 1.solī - Kolorimetriska noteikšana ar viedtālruna attēlu analīzi - kolorimetrijas metode balstās uz redzamās gaismas krāsas noteikšanu augu eļļās, izmantojot viedtālrunī iegūtu attēlu analīzi. Lai noteiktu krāsu toni augu eļļās, tās tika salīdzinātas ar joda kalibrācijas šķīdumiem, kas sagatavoti saskaņā ar GOST 5477-2015 metodi (GOST 5477, 2015), un izteikti kā krāsas skaitlis.

Posma 2. solī - Augu eļļu fluorescences kolorimetriskā analīze - fluorescences kolorimetriskā analīzes metode balstās uz augu eļļu fluorescenci, izmantojot 390 nm LED gaismas spektru un viedtālrunī iegūtu attēlu analīzi.

Radikāļu neitralizēšanas aktivitātes un kopējo fenolu satura noteikšana, izmantojot viedtālrunī iegūtu attēlu analīzi, pētījuma IV posms ietver 2 soļus.

Posma 1. solī noteikta augu eļļu: **1. radikāļu neitralizēšanas aktivitāte**, kur metodes pamatā ir radikāļu neitralizēšanas aktivitātes noteikšana augu eļļās, izmantojot viedtālruna attēlu analīzi un sarkano, zaļo un zilo (RGB) krāsu sistēmu. Radikāļu neitralizēšanas aktivitāte tiek izteikta kā DPPH radikāla inhibīcija procentos (RSA); **2. kopējais fenolu saturs**, kur metodes pamatā ir

kopējo fenolu satura noteikšana augu eļļās, izmantojot viedtālrunī iegūtu attēlu analīzi un sarkano, zaļo un zilo (RGB) krāsu sistēmu.

Posma 2. solī veikta kopējo fenolu satura noteikšanas metodes novērtējums un statistiskā analīze, ietver sarkanās krāsas (R) vērtību izmantošanu, kas iegūtas no viedtālruna attēliem analīzes gaitā. Kalibrācijas līkņu linearitāte tika novērtēta, pielietojot regresijas modeli izmantotajiem datu punktiem. Tika aprēķināts katras kalibrācijas līknes slīpums, brīvais loceklis un to kļūdas. Atbilstība tika novērtēta, izmantojot determinācijas koeficientu (R^2), kā arī papildus veikts F-tests, lai salīdzinātu abus kalibrācijas modeļus un noteiktu labāko atbilstību. Noteikšanas (LOD) un kvantificēšanas (LOQ) robežas tika aprēķinātas, izmantojot kalibrācijas līknes un to iegūtos vienādojumus, tādējādi iegūstot zemāko iespējamo noteikšanas koncentrācijas robežu un zemāko koncentrāciju, ko var precīzi kvantificēt. Metodes precizitāte un atkārtojamība tika novērtēta, analizējot augu eļļas paraugus 10 atkārtojumos. Lai novērtētu mērījuma mainīgumu, tika aprēķināta relatīvā standartnovirze (%RSD).

Algoritma izstrāde Python programmēšanas valodā un tā integrācija viedtālruna lietotnē, pētījuma V posms ietver 2 soļus. **Posma 1. solī - Kopējo fenolu satura un radikāļu saistīšanās aktivitātes (RSA) noteikšanas** algoritma izstrādes pamatā ir Python programmēšanas valodas izmantošana, lai viedtālrunī iegūtos RGB krāsu sistēmas datus varētu ievadīt un apstrādāt Microsoft Windows 10 un 11, kā arī tīmekļa pārlūkprogrammu vidēs, kā piemēram Kaggle (<https://www.kaggle.com>).

Izstrādātie Python algoritmi pieejami viedtālruna attēlu analīzes projekta tīmekļa lietotnē: <https://github.com/SanitaVucane/Analysis-of-Smartphone-images-in-RGB-colour-system>² un <https://github.com/SanitaVucane/Determination-of-radical-scavenging-activity-using-smartphone-image-analysis>³.

Kā arī reģistrēti Zenodo repozitorijā – zinātnes platformā, ko uztur CERN sadarbībā ar OpenAIRE projekta ietvaros un ar Eiropas Komisijas atbalstu – iegūstot digitālos objektu identifikatorus (DOI): <https://doi.org/10.5281/zenodo.15225435> un <https://doi.org/10.5281/zenodo.15229741>

Posma 2. solis ietver viedtālruna lietotnes *DiColorimetry* izstrādi, kuras pamatā ir Flutter atvērta pirmkoda programmatūras Flutter (Google) ietvars, kas

² Determination of total phenols in Vegetable oils

<https://github.com/SanitaVucane/Analysis-of-Smartphone-images-in-RGB-colour-system> : Resurss skatīts 2024. gada 15. augustā.

³ Determination of Radical Scavenging Activity

<https://github.com/SanitaVucane/Determination-of-radical-scavenging-activity-using-smartphone-image-analysis> Resurss skatīts 2024. gada 15. augustā.

balstīts uz Dart programmēšanas valodu integrējot iepriekš izstrādātos Python algoritmus. Zenodo, CERN. <https://doi.org/10.5281/zenodo.15328506>.

Statistiskās datu apstrādes metodes

Datu apstrāde veikta ar matemātiskās statistikas metodēm. Iegūtajiem rezultātiem aprēķināti vidējie aritmētiskie lielumi, relatīvā standartnovirze (%RSD), t-tests, klāstera analīze, izmantojot hierarhisko metodi, kur objektu klasifikācija ir veikta pēc Warda, lietojot IBM SPSS Statistics programmas paketi (versija 23.0.0.0, George & Mallery 2016). Kopējo fenolu satura un radikāļu neutralizēšanas aktivitātes statistiskā apstrāde un korelācijas analīze veikta, izmantojot Python programmēšanas valodu (versija 3.11, Windows 10) un Kaggle tīmekļa lietotni, kas ļauj izpētīt un veidot Python modeļus tīmekļa vidē (<https://www.kaggle.com>).

REZULTĀTI UN DISKUSIJA

1. Augu eļļu kvalitātes rādītāji

Lai noskaidrotu augu eļļu svaiguma pakāpi tika noteikti augu eļļu kvalitātes rādītāji, kā peroksīda, joda un skābes skaitļi, kā arī to ietekmi uz eļļas kvalitāti un svaigumu. Peroksīda skaitlis raksturo eļļās esošā peroksīdu formā saistītā skābekļa daudzumu, kas norāda uz eļļas svaigumu un bojāšanās procesu. Tika konstatēts, ka tirdzniecībā iegādāto augu eļļu grupās peroksīda skaitļi svārstījās robežās no 1.1 ± 0.1 mEq O₂ kg⁻¹ rapšu eļļas grupā līdz 5.1 ± 0.1 mEq O₂ kg⁻¹ smiltsērķšķu eļļas grupā. *Codex Alimentarius* standarts nosaka, ka svaigām nerafinētām augu eļļām peroksīda skaitlim jābūt līdz 15 mEq O₂ kg⁻¹.

Aktīvā skābekļa masa augu eļļu grupās variē no 8.8 ± 0.4 mg kg⁻¹ rapšu eļļas grupā līdz 39.2 ± 0.4 mg kg⁻¹ smiltsērķšķu eļļas grupā. Tas norāda, ka eļļas ar zemāku aktīvā skābekļa saturu, piemēram, rapšu un kukurūzas, būs ilgāk uzglabājamās.

Linsēklu eļļas grupai konstatēts vislielākais joda skaitlis 185 ± 1 g 100 g⁻¹, bet olīvu eļļas grupai – vismazākais, 87 ± 1 g 100 g⁻¹. *Codex Alimentarius* standarts nosaka, ka linsēklu eļļas joda skaitlim jābūt no 170 līdz 211 g 100 g⁻¹. Pamata joda skaitlis raksturo nepiesātināto taukskābju daudzumu eļļā, tomēr samazinoties dubultsaišu skaitam, ir iespēja noteikt arī tās oksidācijas pakāpi un ietekmi uz kvalitāti.

Skābes skaitlis norāda uz brīvo taukskābju daudzumu taukos, kas ietekmē eļļas uzglabāšanas laiku un kvalitāti. Skābes skaitļa vērtības pētītajās augu eļļu grupās bija robežās no 1.3 ± 0.1 mg KOH g⁻¹ rīsu kliju eļļas grupā līdz 2.5 ± 0.1 mg KOH g⁻¹ smiltsērķšķu eļļas grupā. *Codex Alimentarius* standarts nosaka, ka nerafinētām eļļām, kas iegūtas ar aukstās spiešanas tehnoloģiju, skābes skaitlis nedrīkst pārsniegt 4.0 mg KOH g⁻¹.

Pētījumā konstatēts, ka visas izvēlētās augu eļļas atbilst svaigas eļļas kvalitātes kritērijiem, kas noteikts *Codex Alimentarius* standartā, līdz ar to var tikt izmantotas turpmākiem kolorimetriskiem pētījumiem.

2. Optimālās distances noteikšana attēlu iegūšanai

Lai noteiktu optimālo attālumu no viedtālruņa kameras objektīva attēla un maksimālās krāsas iegūšanai, tika izmantotas augu eļļas, kas iepildītas PS 2.5 mL vienreizējās lietošanas makro kivetē. Makro kivete tika ievietota fotostudijas kamerā. Izmantojot X-Rite ColorChecker krāsu paneli, kas tiek izmantots profesionālo fotokameru krāsu un balansa attēlu un video uzņemšanai (Hunt & Pointer 2011), tika konstatēts, ka dzeltenās krāsas vērtības RGB krāsu sistēmā ir 185, 151, 18 pikseli (px) jeb RGB (185, 151, 18) (2. att.).



2. att. X-Rite ColorChecker krāsu paneļa attēls /

Fig. 2. Image of the X-Rite ColorChecker colour panel

Rapšu eļļai, kas tika izvēlēta par pamatu vizuālam salīdzinājumam (3.att), optimālais attālums no viedtālruņa kameras objektīva līdz analizējamajam objektam ir noteikts kā 12.0 ± 0.1 cm ar RGB vērtībām 178, 152, 31 px. Šīs vērtības ir vistuvāk X-Rite ColorChecker krāsu paneļa (2. att.) dzeltenās krāsas vērtībām (RGB 185, 151, 18 px), norādot uz visprecīzāko krāsu attēlojumu šajā konkrētajā attālumā.

Kā redzams 3. attēlā, atkarībā no viedtālruņa attāluma mainās noteikšanas reģiona diapazons, kas ietekmē RGB krāsu sistēmas skaitliskās vērtības. Izvērtējot pārējo deviņu augu eļļu grupu vidējās RGB vērtības, tika novērota līdzīga tendence attiecībā uz attālumu un krāsu intensitāti.

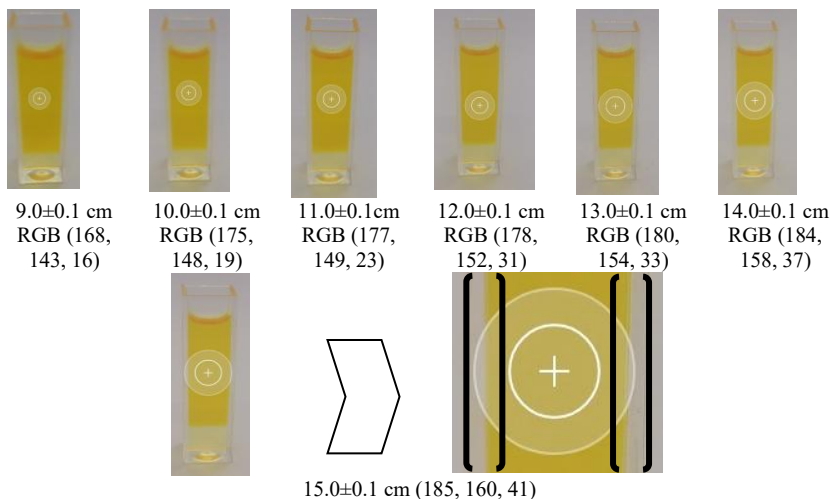
Visām augu eļļām attālumos, kas pārsniedz 12.0 ± 0.1 cm, novērota RGB vērtību pieauguma tendence, ko izskaidro krāsas – īpaši zaļās (G) un zilās (B) – tuvināšanās baltajai krāsai (RGB: 255 px). Kā parādīts 3. attēlā, attāluma 15.0 ± 0.1 cm noteikšanas reģiona robežas pārsniedz kivetes laukumu (piemērā: rapšu eļļa), tādējādi aprēķinā tiek iekļauta arī baltā fona krāsa fotostudijā, kas veicina kopējo RGB vērtību tuvināšanos maksimumam – 255 px. Savukārt, samazinoties attālumam mazāk kā 12.0 ± 0.1 cm, visās augu eļļu grupās tika novērots RGB vērtību samazinājums, īpaši G un B krāsu kanālos, kas norāda uz tendenci

tuvināties melnajai krāsai (RGB: 0 px). Šī parādība skaidrojama ar to, ka mazāks attālums starp objektīvu un paraugu samazina caurejošās gaismas daudzumu, kā rezultātā zūd krāsas intensitāte un attēla skaidrība. Šādos apstākļos LED apgaismojums tiek vairāk absorbēts, un viedtālruņa kamerai kļūst grūtāk nodrošināt precīzu fokusēšanu, kas negatīvi ietekmē RGB vērtību fiksāciju.

Augu eļļām ar tumšākiem vai piesātinātākiem toņiem, piemēram, smiltsērķšķu un kaņepju eļļām, kuru sākotnējās RGB vērtības (pie 12 cm) jau ir zemākas, vērojams straujāks RGB vērtību kritums tuvākā attālumā. Tas norāda uz būtiskām atšķirībām gaismas caurlaidībā starp dažādiem paraugiem. Savukārt gaišākas eļļas, piemēram, rīsu vai saulespuķu eļļas, uzrāda mazāku RGB vērtību samazinājumu, saglabājot salīdzinoši augstu krāsas precizitāti.

Izvērtējot iegūtos rezultātus, secināts, ka optimālais attālums precīzai krāsu vērtību noteikšanai visiem analizētajiem augu eļļu paraugiem ir 12.0 ± 0.1 cm. Šajā attālumā tiek nodrošināts skaidrs un līdzsvarots krāsu spektrs, kas visprecīzāk atbilst reālajām krāsām, vienlaikus novēršot pārāk gaišu (baltā fona ietekmē) vai pārāk tumšu (gaismas absorbcijas ietekmē) toņu parādīšanos. Aprēķinātā t-vērtība ($p < 0.001$) apliecina, ka, pie 95% ticamības līmeņa, pastāv statistiski nozīmīgas atšķirības starp attālumu no viedtālruņa objektīva līdz paraugam un iegūtajām RGB krāsu sistēmas vērtībām.

Kā redzams 3. attēlā atkarībā no viedtālruņa attāluma mainās noteikšanas reģiona diapazons, kas ietekmē RGB sistēmas skaitliskās vērtības.



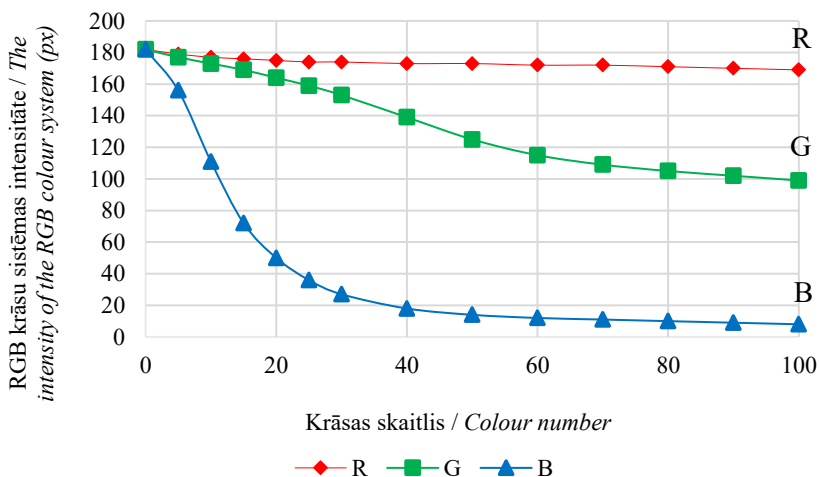
3. att. Rapšu eļļas krāsu attēli, RGB krāsu sistēmas vērtības un noteikšanas reģioni / Fig. 3. Images of rapeseed oil colours, RGB colour system values, and detection regions

Lai noteiktu, kā noteiktais attālums ietekmē melno vai balto krāsu, tika izmantots X-Rite ColorChecker krāsu panelis. Aprēķinātās t-vērtības baltajai

(3.69, $p > 0.05$) un melnajai (0.12, $p > 0.05$) krāsai liecina, ka, izmantojot 95% ticamības līmeni, nav statistiski nozīmīgu atšķirību starp attālumiem no viedtālruņa objektīva un X-Rite ColorChecker krāsu paneļa melnajai un baltajai krāsai. Līdz ar to var secināt, ka attālums robežās no 9.0 ± 0.1 līdz 15.0 ± 0.1 cm neietekmē baltās vai melnās krāsas izmaiņas, jo nav šķēršļu gaismas nonākšanai līdz objektīvam. Šādas izmaiņas var ietekmēt pētāmais objekts, kas absorbē noteiktu daudzumu gaismas, vai arī tas, ka noteikšanas reģiona robežas ir ārpus analizējamā objekta kivešu laukuma, tādējādi ņemot vērā arī izmantojamā fona krāsu, kas rada kļūdu patiesās krāsas iegūšanā.

3. Kolorimetriskā noteikšana, izmantojot viedtālruņa attēlu analīzi

RGB krāsu sistēmā krāsas skaitļa noteikšanai tika izmantota joda kalibrācijas šķīduma digitālā attēlveidošana, kas parāda izmaiņas atkarībā no šķīduma koncentrācijas. Rezultāti tika izteikti kā krāsas skaitlis diapazonā no 0 līdz 100 joda kalibrēšanas šķīdumam, ņemot vērā R-sarkanās, G-zaļās un B-zilās krāsas intensitāti (4. att.).

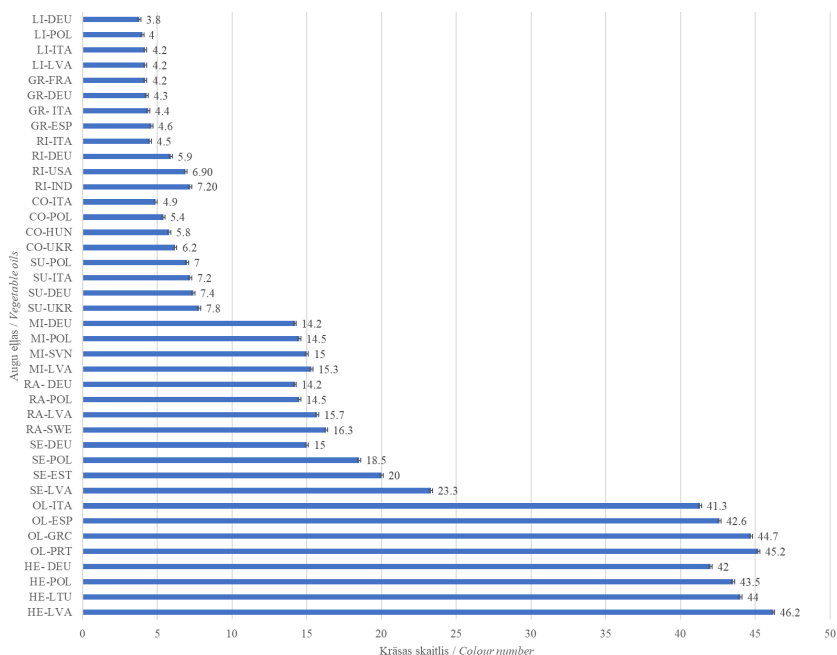


4. att. RGB krāsu sistēmas izmaiņas atkarībā no joda standartšķīduma koncentrācija, kas izteikts kā krāsas skaitlis / Fig. 4. Changes in the RGB colour system depending on the concentration of iodine standard solution, expressed as a colour number

Ievērojamas izmaiņas joda kalibrācijas šķīduma krāsas skaitlī tika novērotas zaļajā (G) un zilajā (B) krāsā. Zaļās krāsas izmaiņas (G) tika konstatētas visā krāsas skaitļa liknē, savukārt zilās krāsas intensitāte strauji samazinājās

diapazonā no 158 līdz 20 px. Šāds zilās krāsas intensitātes samazinājums ir saistīts ar dzeltenās krāsas intensitātes pieaugumu, palielinoties joda koncentrācijai šķīdumā. Zilās krāsas samazināšanās ir likumsakarīga, jo šī krāsa neveicina dzeltenās krāsas veidošanos, kas ir sekundāra krāsa, veidojoties no sarkanās un zaļās krāsas sajaukuma. Pētījumā tika konstatēts, ka visos joda kalibrācijas šķīdumos sarkanās krāsas intensitāte praktiski nemainījās.

Augu eļļas var saturēt ne tikai dzelteno krāsu, bet arī zaļo pigmentu, piemēram, hlorofilu, kas atrodams kaņepju vai olīveļļā. Tādēļ, lai iegūtu precīzāku augu eļļu kolorimetrisko krāsu spektru, tika aprēķināta visu triju krāsu (sarkanās, zaļās, zilās) sistēmas vidējā RGB ($RGB_{\text{vid} / \text{avg}}$) vērtība. Šī vidējā krāsas vērtība tika pārveidota par absorbciju saskaņā ar Bēra-Lamberta vienādojumu, un tika iegūta joda šķīduma kalibrēšanas līkne, kas izteikta kā krāsas skaitlis. Iegūtās krāsas skaitļa vērtības augu eļļām ir dotas 5. attēlā.



LI – Linsēklu / Linseed, GR – Vīnogu / Grape, RI – Rīsu kliju / Rice bran, CO – Kukurūzas / Corn, SU – Saulespuķu / Sunflower, MI – Mārdadža / Milk thistle, RA – Rapšu / Rapeseed, SE – Smiltsērķšķu / Sea buckthorn, OL – Olīvu / Olive, HE – Kaņepju / Hemp

5. att. Augu eļļu krāsas skaitlis / Fig. 5. Colour number of vegetable oils

Augstākais krāsas skaitlis tika noteikts kaņepju (42.0 ± 0.1 – 46.2 ± 0.1) un olīvu (41.3 ± 0.1 – 45.2 ± 0.1), bet vismazākais – linsēklu (3.8 ± 0.1 – 4.2 ± 0.1), vīnogu (4.2 ± 0.1 – 4.6 ± 0.1), kukurūzas (4.9 ± 0.1 – 6.2 ± 0.1), rīsu kliju (4.5 ± 0.1 –

7.2±0.1) un saulespuķu (7.0±0.1 – 7.8±0.1) eļļu grupās. Vidēji liels krāsas skaitlis tika konstatēts mārdadža (14.2±0.1 – 15.3±0.1), rapšu (14.2±0.1 – 16.3±0.1) un smiltsērķšķu (15.0±0.1 – 23.3±0.1) eļļu grupās (5. att.).

Izmantotais viedtālrunis noteica trīs primārās dabā sastopamās krāsas – sarkano, zaļo un zilo (Pi et al., 2022). Tā kā baltā krāsa veidojas no visu trīs pamatkrāsu – sarkanās (R), zaļās (G) un zilās (B) – sajaukuma, par fonu attēla iegūšanai ar viedtālruni tika izmantota baltā krāsa (krāsas kods (px) = (255, 255, 255)).

Katrai primārajai krāsai pikseļu vērtības diapazons ir no 0 līdz 255, un baltajai krāsai jābūt ar vērtību 255 pikselī. Izmantojot PULUZ fotostudiju ar gaismas diodēm (LED), tika konstatēts, ka nav iespējams iegūt pilnīgi baltu krāsu jeb 255 pikselus. LED apgaismojumā RGB krāsu sistēmā tika noteikti 182 pikseli. Šāds pikseļu vērtību samazinājums ir saistīts ar izmantotās LED gaismas krāsas temperatūru (3200K), kura nevar sasniegt pilnu baltās krāsas intensitāti, līdz ar to krāsa vairāk tiecas uz melno jeb 0 pikseliem.

Rezultāti liecina, ka kaņepju un olīveļļās ir augsts augu pigmentu saturs, un tās ir bagātas ar bioloģiski aktīvām vielām, piemēram, hlorofiliem un karotinoīdiem. Kaņepju un olīveļļās konstatēts lielāks hlorofilu saturs (138.0 / 2–5 mg kg⁻¹) salīdzinājumā ar karotinoīdiem (33.6 / 6.0 mg kg⁻¹). Ir zināms, ka hlorofils piešķir produktam tumšāku krāsu nekā karotinoīdi, tāpēc krāsas skaitlis šīm eļļām ir lielāks nekā citām augu eļļām (Fakourelis et al., 1987; Nikolova et al., 2014). Linsēklu, vīnogu, rīsu kliju, kukurūzas un saulespuķu eļļās hlorofila saturs ir zems (0.30 līdz 1.79 mg kg⁻¹), savukārt karotinoīdu saturs ir augstāks – no 4.32 līdz 10.6 mg kg⁻¹. Mārdadža un rapšu eļļās konstatēts vidējs hlorofilu saturs (1.79 – 6.56 mg kg⁻¹) un karotinoīdi (5.02 – 9.57 mg kg⁻¹). Zinātniskajā literatūrā smiltsērķšķu eļļa tiek uzskatīta par vienu no bagātākajām ar karotinoīdiem, pārsniedzot 302.8 mg kg⁻¹ eļļas (Li & Beveridge, 2003; Ramadan, 2020). Dažādās krāsas skaitļa vērtības augu eļļās ir atkarīgas no izejvielu kvalitātes, auga šķirnes un izmantotās ražošanas tehnoloģijas.

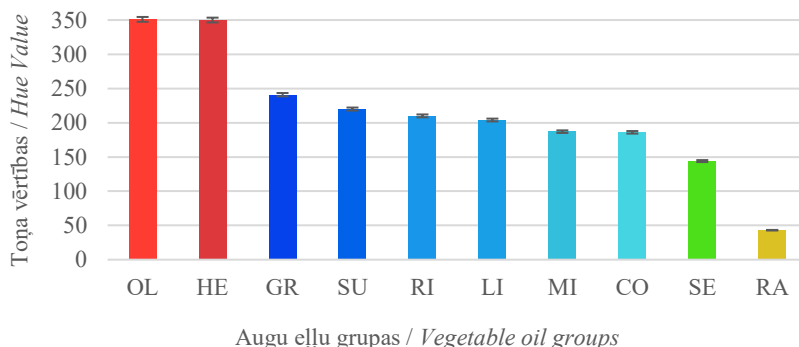
4. Augu eļļu fluorescences kolorimetriskā analīze

Lai iegūtu Toņa vērtības, viedtālruna kolorimetriskie digitālie RGB sistēmas attēli ir jāpārveido par Toņa attēliem, izmantojot HSV krāsu sistēmu.

RGB krāsu sistēma korelē ar cilvēka vizuālās sistēmas uztveri, tomēr tā nespēj pilnībā attēlot visu krāsu spektru. Tāpēc tiek izmantota krāsu sistēma, kas precīzāk atbilst cilvēka krāsu uztverei – HSV krāsu sistēma, kas balstīta uz Toni (Hue), piesātinājumu (Saturation) un vērtību (Value). Šī modeļa priekšrocība ir tā spēja atdalīt ahromatiskās (Value) un hromatiskās (Hue un Saturation) atšķirības (Loesdau et.al. 2014). Iegūto krāsu informāciju no RGB attēla var izmantot Toņa vērtību iegūšanā (6. att.), kas attēlo katrai augu eļļai raksturīgās fluorescējošās krāsas. Toņa vērtības parāda, ka starp olīvu, kaņepju un pārējām bieži sastopamajām augu eļļām pastāv ievērojamas fluorescences atšķirības,

piedāvājot kvantitatīvu pieeju to analīzei. Olīvu–kaņepju, vīnogu–saulespuķu–rīsu kliju–linsēklu un mārdadža–kukurūzas eļļām ir līdzīgas Toņa vērtības.

Toņa vērtības (6. att.) norāda, ka pētītajām 10 augu eļļu grupām ir konstatēti noteikti krāsu toņu diapazoni.



OL – Olīvu / Olive, HE – Kaņepju / Hemp, GR – Vīnogu / Grape, SU – Saulespuķu / Sunflower, RI – Rīsu kliju / Rice bran, LI – Linsēklu / Linseed, MI – Mārdadža / Milk thistle, CO – Kukurūzas / Corn, SE – Smiltsērķšķu / Sea buckthorn, RA – Rapšu / Rapeseed

6. att. Augu eļļu grupu Toņa vērtības /

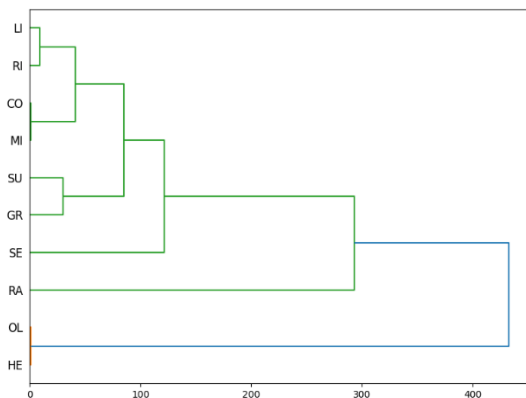
Fig. 6. Hue values of vegetable oil groups

Saskaņā ar 6. attēlu olīvu un kaņepju eļļas atrodas sarkanajā krāsu diapazonā no 330° līdz 360° , attiecīgi ar vidējām vērtībām $351 \pm 1^\circ$ un $350 \pm 1^\circ$. Vīnogu, saulespuķu, rīsu kliju un linsēklu eļļas atrodas zilajā diapazonā no 210° līdz 270° ar vidējām vērtībām $241 \pm 1^\circ$, $220 \pm 1^\circ$, $210 \pm 1^\circ$ un $204 \pm 1^\circ$. Mārdadža un kukurūzas eļļas ietilpst ciāna diapazonā no 150° līdz 210° ar vidējām vērtībām $187 \pm 1^\circ$ un $186 \pm 1^\circ$. Smiltsērķšķu eļļa ir zaļajā diapazonā no 90° līdz 150° ar vidējo vērtību $144 \pm 1^\circ$, un rapšu eļļa atrodas dzeltenajā diapazonā no 30° līdz 90° ar vērtību $43 \pm 1^\circ$.

Augu eļļu Toņa vērtības ir diapazonā no 0° līdz 360° . Lai noteiktu, kurā krāsu diapazonā atrodas desmit augu eļļu grupas, balstoties uz iegūtajām fluorescējošajām krāsām, tika veikta hierarhiskā klasteru analīze (7. att.). Šīs analīzes rezultātā eļļas tika iedalītas piecos klasteros:

1. pirmais klasteris: ietver olīvu un kaņepju eļļas, kas veido līdzīgu sarkanās krāsas toni;
2. otrais klasteris: ietver vīnogu, saulespuķu, rīsu kliju un linsēklu eļļas, kas izceļas ar zilās krāsas toni;
3. trešais klasteris: ietver kukurūzas un mārdadža eļļas, kas veido ciāna toni;
4. ceturtais klasteris: ietver rapšu eļļu, kas rada dzelteno krāsu;
5. piektais klasteris: ietver smiltsērķšķu eļļu, kurai raksturīgs zaļais tonis.

Tādējādi, izmantojot fluorescences īpašības un Toņa vērtības, 10 augu eļļu grupas tika iedalītas piecos dažādos krāsu toņu klāstos: sarkanā, zilā, ciāna, dzeltenā un zaļā.



LI – Linsēklu / *Linseed*, RI – Rīsu kliju / *Rice bran*, CO – Kukurūzas / *Corn*, MI – Mārdadža / *Milk thistle*, SU – Saulespuķu / *Sunflower*, GR – Vīnogu / *Grape*, SE – Smiltsērķšķu / *Sea buckthorn*, RA – Rapšu / *Rapeseed*, OL – Olīvu / *Olive*, HE – Kaņepju / *Hemp*

7. att. Klāsteru analīze Toņa vērtībām, balstoties uz krāsu diapazonu /

Fig. 7. Cluster analysis of Hue values based on the colour range

Olīveļļas spēcīgo fluorescenci nodrošina dabiskās fluorescējošās molekulas, piemēram, hlorofili, tokoferoli, feofitīni, fenola savienojumi un to oksidācijas produkti. Fluorescence no fenola savienojumiem olīveļļā tika konstatēta, izmantojot 362 – 400 nm diapazona robežas (Tena et al., 2009).

Kaņepju eļļa satur hlorofilus, fenola savienojumus, karotinoīdus un tokoferolus, kas arī nodrošina spēcīgu sarkano fluorescenci līdzīgi kā olīveļļā. Sarkanās krāsas fluorescence liecina par augstu hlorofila savienojumu koncentrāciju gan olīvu, gan kaņepju eļļās. Krāsu pāreja no zilas uz ciānu norāda uz E vitamīna (tokoferola) koncentrācijas samazināšanos ciāno virzienā, ar zilo krāsu kā visaugstāko tokoferola koncentrāciju un ciāno ar viszemāko. Smiltsērķšķu eļļas spilgti zaļā krāsa liecina par augstu karotinoīdu saturu (Li & Beveridge, 2003).

5. Radikāļu neitralizēšanas aktivitātes noteikšana

Pētījumā tika noteiktas individuālās un jaukto krāsu vērtības RGB krāsu sistēmā, lai noskaidrotu iespējas kolorimetrisko rādītāju radikāļu neitralizēšanas aktivitātes noteikšanai (RSA). Izmantojot balto fonu, vidējām RGB krāsu sistēmas vērtībām jābūt 255 pikseļiem, bet pētījumi parādīja, ka 96% etanola šķīdumam vidējais RGB samazinās līdz 180 pikseļi. Pikseļu diapazona

samazināšanās ir atkarīga no koncentrācijas un izmantotā gaismas diožu (LED) krāsu temperatūras, kura bija 3200 K.

Tika konstatēts, ka no zilās (B) krāsas iegūtās vērtības atšķīrās no sarkanās (R) un zaļās (G). Atšķirīgā zilās (B) krāsas jutība tika izteikta, apvienojot tās ar sarkanajām (R) vai zaļajām (G) vērtībām, veidojot RB un GB, kuras uzrādīja vājākus rezultātus ($p < 0.05$), salīdzinājumā ar citām RG vērtībām un UV/VIS spektrofotometriju visām augu eļļām. Tāpēc, lai iegūtu precīzākus rezultātus, B, RB un GB vērtības nevar izmantot augu eļļu radikāļu neitralizēšanas aktivitātes aprēķināšanai. 2.2–difēnil–1–pikrilhidrazils (DPPH) ir stabils radikālis ar spēju piesaistīt antioksidantus, kas atrodas augu eļļā, pievienojot ūdeņradi un izveidojot stabilu DPPH–H molekulu (Lee et al., 2007; Choi et al., 2018).

Absorbciija samazinās, krāsai mainoties no violetas uz gaiši dzeltenu viļņa garumā, kas svārstās no 405 līdz 520 nm. DPPH reaģē ar antioksidantu, veidojot dzeltenu krāsu; tomēr klasiskajā UV/VIS spektrofotometrijā maksimālā viļņa garuma absorbciju mēra tikai vienā spektrā – 517 nm.

Izmantojot viedtālruņa attēlu analīzi, var vienlaikus noteikt plašāku redzamās gaismas spektru no 400 līdz 700 nm viļņa garuma; tāpēc ir nepieciešams analizēt radniecīgās jeb komplementārās krāsas, kas tiek attēlotas primārajā un sekundārajā krāsu aplī (8. att.).



8. att. **Primāro un sekundāro krāsu aplis /**
Fig. 8. Primary and secondary colour wheel

Krāsu aplis norāda, ka violetās krāsas komplementārā krāsa ir oranži–dzeltenā (8. att.). Taču viedtālruņa digitālā attēla iegūšanā, izmantojot Android aplikāciju “ColorMeter” un “DiColorimetry”, var noteikt tikai trīs primārās krāsas – sarkano (R), zaļo (G) un zilo (B). Tādēļ, radikāļu neitralizēšanas aktivitātes noteikšanā ir jāizvēlas tāda primārā krāsa, kas ir vistuvāk komplementārajai, jeb sekundārajai, dzeltenajai krāsai. Kā redzams krāsu aplī, vistuvākā primārā krāsa dzeltenajai ir zaļā, bet, lai iegūtu precīzākus rezultātus, jāizmanto arī otra primārā krāsa – sarkanā, tādējādi veidojot RG krāsu sistēmu. Rezultātā, sajaucot sarkano un zaļo krāsu, tiek iegūta dzeltenā sekundārā krāsa.

Augstākā radikāļu neitralizēšanas aktivitāte tika konstatēta Portugāles olīveļļas (OL–PRT) paraugā – UV/VIS spektrofotometrijas (UV/VIS) rezultāts bija $97.5 \pm 0.3\%$, savukārt viedtālruņa RG krāsu sistēmas attēlu analizē (RG) – $97.2 \pm 0.7\%$. Līdzīgi rezultāti tika iegūti arī Grieķijas olīveļļā (OL–GRC) – attiecīgi $96.8 \pm 0.3\%$ un $96.4 \pm 0.7\%$. Tāpat augstu aktivitāti uzrādīja Latvijas kaņepju eļļas (HE–LVA) paraugs – $95.7 \pm 0.3\%$ (UV/VIS) un $95.5 \pm 0.7\%$ (RG), kā arī Latvijas mārdadžu eļļa (MI–LVA) – attiecīgi $94.3 \pm 0.3\%$ un $94.6 \pm 0.6\%$. Smiltsērķšķu eļļā no Latvijas (SE–LVA) tika konstatētas salīdzināmas vērtības: $93.5 \pm 0.3\%$ (UV/VIS) un $93.2 \pm 0.7\%$ (RG).

Zemākā radikāļu neitralizēšanas aktivitāte tika konstatēta Itālijas kukurūzas eļļā (CO–ITA) $61.5 \pm 0.2\%$ (UV/VIS) un $61.3 \pm 0.6\%$ (RG), kā arī rīsu kliju eļļā no tās pašas izcelsmes valsts (RI–ITA), kur rezultāti bija attiecīgi $67.6 \pm 0.2\%$ un $67.1 \pm 0.6\%$.

Augu eļļu klasifikācija grupās, katrā iekļaujot četrus viena veida paraugus no dažādām izcelsmēm, ļāva novērtēt kopējas tendences un identificēt eļļas veidus ar augstāko radikāļu neitralizēšanas aktivitāti. Rezultātos tika konstatēts, ka olīveļļu grupa demonstrēja visaugstāko radikāļu neitralizēšanas aktivitāti – neatkarīgi no izmantotās metodes. Vidējais RSA UV/VIS spektrofotometrijas rezultāts olīveļļu grupā bija $96.5 \pm 0.3\%$, savukārt viedtālruņa attēlu analizē, izmantojot RG krāsu sistēmu – $96.3 \pm 0.7\%$. Visu četru olīveļļu paraugu (OL–ITA, OL–ESP, OL–PRT, OL–GRC) radikāļu neitralizēšanas aktivitātes pārsniedza 95%, kas norāda uz savstarpēju atbilstību un apstiprina abu metožu salīdzināmību šajā eļļu grupā.

Kaņepju eļļu grupa uzrādīja līdzīgas radikāļu neitralizēšanas aktivitātes vērtības, tomēr ar lielāku izkliedi. UV/VIS metodes vidējais bija $87.6 \pm 0.3\%$, kamēr RG vērtību vidējā radikāļu neitralizēšanas aktivitāte sasniedza $87.5 \pm 0.7\%$. Augstākie rādītāji tika novēroti Latvijas (HE–LVA) un Lietuvas (HE–LTU) paraugos (UV/VIS: $95.7 \pm 0.3\%$ un $89.4 \pm 0.3\%$; RG: $95.5 \pm 0.7\%$ un $89.5 \pm 0.7\%$), savukārt Polijas (HE–POL) un Vācijas (HE–DEU) paraugos – nedaudz zemākas radikāļu neitralizēšanas aktivitātes vērtības (RG: $84.0 \pm 0.7\%$ un $81.0 \pm 0.7\%$), iespējams, klimatisko vai agroķīmisko faktoru ietekmē.

Mārdadžu eļļu grupā tika novērota zemāka radikāļu neitralizēšanas aktivitāte nekā kaņepju eļļu grupā – vidēji $86.7 \pm 0.3\%$ (UV/VIS) un $87.6 \pm 0.6\%$ (RG). Latvijas (MI–LVA) un Slovēnijas (MI–SVN) paraugos tika konstatēti augstāki rezultāti, savukārt Vācijas (MI–DEU) paraugs uzrādīja nedaudz zemāku radikāļu neitralizēšanas aktivitāti (UV/VIS: $78.7 \pm 0.2\%$, RG: $81.3 \pm 0.6\%$).

Rapšu eļļu grupā tika konstatēta plašāka radikāļu neitralizēšanas aktivitātes vērtību izkliede – UV/VIS rezultāti svārstījās no $81.0 \pm 0.3\%$ (RA–DEU) līdz $95.2 \pm 0.3\%$ (RA–SWE), ar vidējo vērtību $88.8 \pm 0.3\%$. Savukārt RG svārstījās robežās no $80.7 \pm 0.7\%$ līdz $94.9 \pm 0.7\%$, vidēji sasniedzot $87.7 \pm 0.7\%$. Augstākie rezultāti tika iegūti Zviedrijas (RA–SWE) un Latvijas (RA–LVA) paraugos.

Smiltsērķšķu eļļu grupā tika novērotas nedaudz zemākas radikāļu neitralizēšanas aktivitāte, salīdzinot ar olīveļļas, kaņepju, mārdadžu un rapšu eļļu

grupām. Vidējais RSA UV/VIS analīzē bija $83.9 \pm 0.3\%$, bet RG vidēji sasniedza $83.6 \pm 0.7\%$. Latvijas paraugs (SE–LVA) arī šeit uzrādīja augstāko rezultātu visā smiltsērķšķu eļļas grupā (UV/VIS: $93.5 \pm 0.3\%$, RG: $93.2 \pm 0.7\%$).

Saulespuķu un linsēklu eļļu grupās raksturīga lielāka iekšgrupas mainība. Saulespuķu eļļu grupā UV/VIS vērtības svārstījās no $74.3 \pm 0.2\%$ līdz $85.0 \pm 0.3\%$, ar vidējo – $79.3 \pm 0.2\%$, savukārt RG svārstījās plašāk – no $73.8 \pm 0.6\%$ līdz $85.8 \pm 0.6\%$, vidēji – $79.4 \pm 0.6\%$. Linsēklu eļļu grupā bija attiecīgi – vidēji $67.7 \pm 0.2\%$ (UV/VIS) un $67.8 \pm 0.6\%$ (RG).

Zemākās kopējās radikāļu neitralizēšanas aktivitātes vērtības tika konstatētas rīsu kliju, kukurūzas un vīnogu eļļu grupās. Rīsu kliju eļļu paraugi uzrādīja UV/VIS radikāļu neitralizēšanas aktivitāti robežās no 67.6% līdz 77.0% , ar vidējo – $73.2 \pm 0.2\%$, bet RG analīzē – vidēji $73.0 \pm 0.6\%$. Kukurūzas eļļas grupā novērotas vēl zemākas vērtības: UV/VIS rezultāti bija robežās no $61.5 \pm 0.2\%$ līdz $77.3 \pm 0.2\%$, ar vidējo – $69.7 \pm 0.2\%$, savukārt RG – no $61.3 \pm 0.6\%$ līdz $76.7 \pm 0.6\%$, vidēji $69.3 \pm 0.6\%$. Vīnogu eļļu grupā vērojama izteikta vērtību dispersija: UV/VIS rezultāti svārstījās no $59.1 \pm 0.2\%$ līdz $88.7 \pm 0.3\%$, bet RG – no $56.7 \pm 0.6\%$ līdz $83.7 \pm 0.6\%$, vidēji sasniedzot $71.8 \pm 0.2\%$ (UV/VIS) un $69.7 \pm 0.6\%$ (RG). Viszemākie rādītāji konstatēti Francijas (GR–FRA) un Vācijas (GR–DEU) paraugos, iespējams, saistībā ar atšķirīgām iegūšanas metodēm, izejvielu apstrādi, kā arī klimatisko vai agroķīmisko faktoru ietekmi.

Salīdzinot UV/VIS spektrofotometriju ar viedtālruņa attēlu analīzi, rezultāti liecina, ka viedtālruņa attēlu RG krāsu sistēmas dati visprecīzāk korelē ar UV/VIS metodi – t -vērtība 0.47 ($p > 0.05$) norāda uz ciešu sastību starp mērījumiem.

Apkopotie dati norāda, ka relatīvā standartnovirze (RSD) brīvo radikāļu neitralizēšanas aktivitātes noteikšanai, izmantojot viedtālruņa attēlu analīzes (VAA) metodi, vidēji bija 0.8% , kas ir par 0.5% vienībām lielāka nekā tradicionālajā UV/VIS spektrofotometrijā (UV/VIS) novērotā – 0.3% . Šī atšķirība atspoguļo krāsas ietekmi uz analīzes procesu, kas raksturīga konkrētajai metodei, jo RSD kopējo fenolu satura (TPC) noteikšanai, izmantojot VAA, bija 0.7% , kas ir par 0.1% mazāka, lietojot identiskus nosacījumus – vienādu attālumu, baltu fonu, apgaismojumu un viedtālruņa iestatījumus.

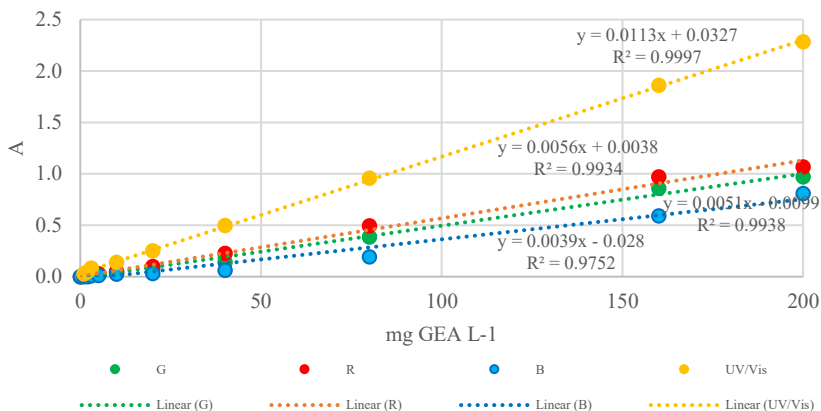
Atkārtojamība, kas aprēķināta pēc ISO 5725–2 standarta, izmantojot formulu $r = 2.8 \times \text{RSD}$, VAA metodei sasniedza 2.3% , salīdzinot ar 0.8% UV/VIS. Šīs vērtības atbilst 95% ticamības intervālam starp pāra mērījumu atšķirībām. Lai gan VAA metodes atkārtojamības intervāls ir plašāks, tas joprojām atbilst analītiskās ķīmijas metožu pieļaujamajai validācijas robežai ($\leq 5\%$). Atšķirības pieaugums no UV/VIS vidējās 0.8% (maksimālā – 1.0%) līdz VAA metodes vidējai vērtībai 2.3% (maksimālā – 3.0%) norāda uz attēla iegūšanas un algoritmiskās apstrādes mainīguma ietekmi; tomēr tas neietekmē metodes piemērotību kvantitatīvai noteikšanai.

Precizitātes novērtējums liecina, ka VAA metodes vidējā absolūtā novirze bija 0.7% (maksimālā – 4.4%), salīdzinot ar UV/VIS. Tas norāda uz minimālu sistemātisko kļūdu un atbilstību pieļaujamajai $\pm 5\%$ robežai.

Iegūtie rezultāti brīvo radikāļu neitralizēšanas aktivitātes noteikšanā apstiprina, ka, ievērojot standartizētus attēla iegūšanas nosacījumus un izmantojot atbilstošu attēla apstrādes lietotni, viedtālruņa VAA metode spēj nodrošināt pietiekamu precizitāti ($RSD < 1\%$), atkārtojamību ($r < 2.3\%$) un precizitāti ($< 4.5\%$). Tādējādi šo metodi var uzskatīt par piemērotu alternatīvu UV/VIS brīvo radikāļu neitralizēšanas aktivitātes noteikšanai.

6. Kopējo fenolu satura noteikšana

Lai noteiktu kopējo fenolu saturu, tika izveidotas kalibrācijas līknes, izmantojot spektrofotometra un viedtālruņa attēlu analīzi. Līknes iegūtas, balstoties uz gallusskābes kalibrācijas šķīdumiem ar zināmām koncentrācijām (9. att.).



9. att. Galluskābes kalibrācijas līkne, izmantojot RGB krāsu sistēmu, ar viedtālruņa attēlu analīzi un spektrofotometru / Fig. 9. Calibration curve of gallic acid using the RGB colour system with smartphone image analysis and spectrophotometry

Katrā paraugā tika reģistrētas RGB krāsu kanālu intensitātes, kuras attēlotas pret atbilstošo koncentrāciju, veidojot lineārās regresijas līknes – katram krāsu kanālam atsevišķi.

Rezultātā iegūti šādi determinācijas koeficienti: $R^2 = 0.9934$ sarkanajam, $R^2 = 0.9938$ zaļajam un $R^2 = 0.9752$ zilajam krāsu kanālam. Šie rādītāji atspoguļo augstu linearitāti starp reģistrēto krāsu intensitāti un fenolu koncentrāciju, tādējādi apliecinot, ka arī attēlu analīzes metode ir piemērota kvantitatīviem mērījumiem. Salīdzinājumam, UV/VIS spektrofotometriskajā analīzē, determinācijas koeficients tika noteikts $R^2 = 0.9997$ (9. att.)

Lai novērtētu kopējo fenolu satura noteikšanas metodi, veikti šādi statistiskie aprēķini: regresijas analīze, t-tests, determinācijas koeficients (R^2), F-tests, relatīvā standartnovirze (%RSD), matricas efekts, ekvivalences testu (TOST), noteikšanas robeža (LOD) un kvantificēšanas robeža (LOQ).

Nosakot sarkanās krāsas (R) vērtības viedtālrūnī iegūtiem attēliem, tās tika izmantotas, lai aprēķinātu galluskābes koncentrācijas absorbcijas rezultātus. Izvērtējot galluskābes kalibrācijas linearitāti intervālos no 1 līdz 200 mg L⁻¹ un no 1 līdz 160 mg L⁻¹, tika iegūti šādi vienādojumi: $y = 0.0056x + 0.006$ ($R^2 = 0.9935$) un $y = 0.0061x - 0.002$ ($R^2 = 0.9988$)

Tika konstatēts, ka labāka linearitāte iegūta, izmantojot 9 kalibrācijas punktus ar galluskābes koncentrāciju robežās no 1 līdz 160 mg GAE L⁻¹. F-tests ir daudz mazākā diapazonā no 1 līdz 160 mg L⁻¹ (5.28×10^{-13}), salīdzinot ar diapazonu no 1 līdz 200 mg L⁻¹ (3.74×10^{-11}), kas parāda būtisku atšķirību piemērotības kvalitātē starp abiem diapazoniem. Kalibrācijas līkne diapazonam no 1 līdz 160 mg L⁻¹ ir labāka nekā diapazonam no 1 līdz 200 mg L⁻¹.

Ņemot vērā, ka F tests bija statistiski nozīmīgs un iegūtā līkne bija lineāra, tika konstatēts, ka, izmantojot galluskābes koncentrāciju no 1 līdz 160 mg L⁻¹ deviņu punktu kalibrācijā, iegūti precīzāki rezultāti. Rezultātā tika aprēķinātas noteikšanas (LOD) un kvantificēšanas robežas (LOQ).

Tika konstatēts, ka metodes noteikšanas robeža (LOD) ir 1.254 mg L⁻¹ un kvantificēšanas noteikšanas robeža (LOQ) ir 3.801 mg L⁻¹. Tādējādi izstrādātās metodes galluskābes mērījumu diapazons ir no 3.801 līdz 160 mg L⁻¹. Turklāt tika novērots, ka analizēto augu eļļu matricas efekts nepārsniedz $\pm 5\%$, kas norāda uz metodes piemērotību dažādu paraugu sastāvam un nelielu matricas ietekmi uz kopējo fenolu kvantitatīvo noteikšanu. Literatūrā minētās LOD un LOQ vērtības apstiprina iegūtos rezultātus, norādot LOD diapazonu no 1.20 līdz 2.20 mg GAE L⁻¹ un LOQ diapazonu no 3.60 līdz 6.60 mg GAE L⁻¹, izmantojot pētījumos kafijas produktus (Anh-Dao et al., 2023). Autori iesaka izmantot zilo (B) krāsu augu ekstraktiem, kas ir bagāti ar fenolu savienojumiem, bet sarkano (R) krāsu – tiem, kuriem ir zemāks fenolu savienojumu saturs.

Lai kvantitatīvi salīdzinātu viedtālrūņa attēlu analīzes precizitāti ar UV/VIS spektrofotometriju, tika veikts t-tests, kas parādīja, ka aprēķinātā t-vērtība (4.63; $p < 0.05$) ir lielāka par kritisko, norādot uz statistiski nozīmīgām atšķirībām starp abām metodēm. Tomēr, veicot ekvivalences testu (TOST) ar praktiski nozīmīgām robežām ± 5 mg GAE kg⁻¹, iegūtais 95% ticamības intervāls (0.27; 0.69 mg GAE kg⁻¹) pilnībā ietilpa pieļaujamajā robežā, kas nozīmē, ka viedtālrūņa attēlu analīzes metode nodrošina pietiekamu precizitāti fenolu koncentrācijas noteikšanai.

Kopumā analizēti 40 dažādu augu eļļu paraugi, kas iedalīti desmit grupās atbilstoši eļļas veidam. Katras grupas ietvaros izvēlēti četri paraugi no dažādām ģeogrāfiskām izcelsmēm, kas ļāva izvērtēt fenolu saturu ne tikai starp dažādiem eļļas veidiem, bet arī to ieguves reģioniem.

Visaugstākais kopējais fenolu saturs noteikts olīveļļā no Portugāles (OL–PRT) un kaņepju eļļā no Latvijas (HE–LVA). Spektrofotometriskajā analīzē

šiem paraugiem tika noteikta attiecīgi 400.1 ± 1.6 un 181.4 ± 0.7 mg GAE kg⁻¹ eļļas, bet viedtālruņa attēlu analīzē – 400.0 ± 2.5 un 184.5 ± 1.1 mg GAE kg⁻¹ eļļas, kas norāda uz līdzvērtīgu metožu savstarpēji iegūtiem datiem. Salīdzinoši, zemākais kopējo fenolu saturs konstatēts vīnogu un kukurūzas eļļās, kurās spektrofotometra dati bija robežās no 10.8 ± 0.1 mg GAE kg⁻¹ Francijas vīnogu eļļā (GR–FRA) līdz 13.2 ± 0.1 mg GAE kg⁻¹ Itālijas kukurūzas eļļai (CO–ITA), savukārt viedtālruņa attēlu analīzes vērtības svārstījās no 10.4 ± 0.1 mg GAE kg⁻¹ (GR–FRA) līdz 12.9 ± 0.1 mg GAE kg⁻¹ (CO–ITA).

Analizējot paraugu grupas, konstatēts, ka visaugstākais fenolu saturs tika noteikts olīveļļu grupā, kurā Portugāles (OL–PRT) un Grieķijas (OL–GRC) paraugi uzrādīja ievērojami augstākas vērtības nekā Itālijas (OL–ITA) un Spānijas (OL–ESP) olīveļļas. Tas norāda uz iespējamu ietekmi no audzēšanas apstākļiem vai apstrādes metodes. Līdzīga tendence vērojama kaņepju eļļu grupā, kur Latvijas (HE–LVA) un Lietuvas (HE–LTU) paraugi uzrādīja augstākas fenolu koncentrācijas nekā Polijas (HE–POL) un Vācijas (HE–DEU) paraugi. Šīs atšķirības var būt saistītas ar klimatiskajiem un augsnes faktoriem.

Savukārt rapšu eļļu grupā novērotās vērtības bija ievērojami zemākas nekā olīveļļas grupā, kas ir sagaidāmi, ņemot vērā rapšu eļļas ķīmiskā sastāva atšķirības. Lielākās vērtības tika konstatētas Zviedrijas (RA–SWE) un Latvijas (RA–LVA) paraugos (101.4 ± 0.4 un 89.5 ± 0.3 mg GAE kg⁻¹), bet zemākās – Vācijas (RA–DEU) un Polijas (RA–POL) paraugos (80.7 ± 0.3 un 85.9 ± 0.3 mg GAE kg⁻¹). Šīs nelielās variācijas var būt saistītas ar rapšu šķirņu atšķirībām un reģionālajām audzēšanas praksēm.

Zemākais fenolu saturs grupā konstatētas vīnogu un kukurūzas eļļu grupās. Vīnogu eļļu grupā visaugstākais fenolu saturs tika noteikts Spānijas (GR–ESP) eļļā (15.3 ± 0.1 mg GAE kg⁻¹), bet zemākais – Francijas (GR–FRA) eļļā (10.8 ± 0.1 mg GAE kg⁻¹). Šīs zemās vērtības liecina, ka vīnogu eļļās fenolu koncentrācija ir salīdzinoši maza, kas var būt saistīts ar eļļas ekstrakcijas metodi un izejvielas apstrādes veidu. Līdzīgi kukurūzas eļļu grupā tika novērotas zemākās fenolu koncentrācijas visā pētījumā, kas liecina, ka šīs eļļas ķīmiskais sastāvs atšķiras no citām augu eļļām un fenolu saturs tajās ir ierobežots.

Neskatoties uz dažām atšķirībām starp metodēm, viedtālruņa attēlu analīze nodrošina fenolu satura noteikšanu, ko apliecina statistiski nozīmīgā korelācija starp metodēm un nelielā relatīvā kļūda norāda, ka šo metodi var izmantot kā alternatīvu UV/VIS spektrofotometrijai.

Salīdzinot UV/VIS spektrofotometra un viedtālruņa attēlu analīzes mērījumus, tika konstatēts, ka relatīvā standarta novirze (%RSD) kopējā fenolu satura noteikšanā (TPC) bija attiecīgi 0.5% un 0.7%, norādot, ka abas metodes nodrošina augstu precizitāti un atkārtojamību. Jāatzīmē, ka literatūrā norādītais %RSD spektrofotometrijai svārstās no 0.1 līdz 4.8% (Yanti et al., 2017; Jakubíková et al., 2022; Anh-Dao et al., 2023; Zugazua-Ganado et al., 2024).

Lai gan mazāka mērījumu izkliede UV/VIS spektrofotometrā ļauj iegūt precīzākus rezultātus, tomēr viedtālruņa attēlu analīzes mērījumus var izmantot kā alternatīvu UV/VIS spektrofotometrijai. Diemžēl zinātniskajā literatūrā nav

izdevies atrast datus par viedtāluņa attēlu analīzes izmantošanu kopējo fenolu satura noteikšanai augu eļļās.

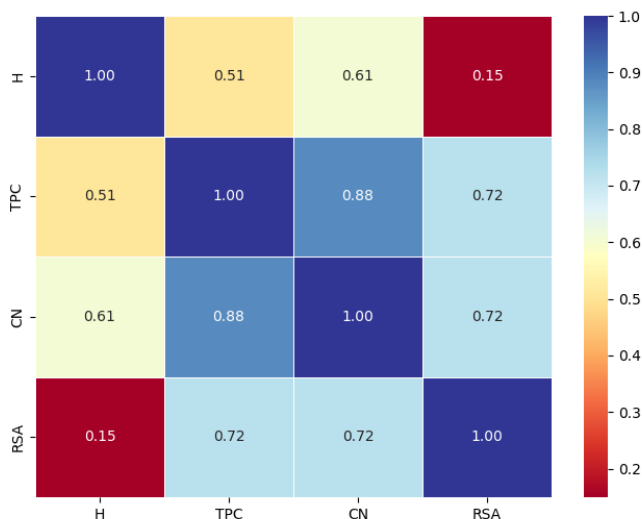
Salīdzinājumā ar literatūrā norādītām vērtībām, šajā pētījumā izstrādātā viedtāluņa attēlu analīzes (VAA) metode uzrādīja būtiski zemākas %RSD vērtības, kas norāda uz analītisko precizitāti un stabilitāti starp atkārtotiem mērījumiem.

Saskaņā ar ISO 5725–2 standartu tika noteikta atkārtojamības robeža ($r = 2.8 \times \text{RSD}$), lai novērtētu mērījumu konsekveni. Šī robeža nosaka maksimāli pieļaujamo atšķirību starp diviem neatkarīgiem mērījumiem ar 95% ticamību. UV/VIS uzrādīja vidējo atkārtojamību r 1.3% (maksimāli – 2.6%), savukārt VAA metode – vidēji 1.9% (maksimāli – 3.3%). Tādējādi divi secīgi mērījumi, izmantojot VAA metodi, vidēji atšķirsies $\pm 1.9\%$ robežās (salīdzinot ar $\pm 1.3\%$ UV/VIS), bet maksimālajā novērotajā mainīgumā $\pm 3.3\%$. Gan vidējās, gan maksimālās atkārtojamības vērtības atbilst vispārpieņemtajiem analītiskajiem metodes noteikšana kritērijiem ($r \leq 5\%$), apliecinot, ka VAA nodrošina uzticamu rezultātu atkārtojamību.

Precizitāte tika novērtēta, aprēķinot absolūto procentuālo atšķirību starp rezultātiem, kas iegūti ar VAA attiecībā pret UV/VIS. Tika konstatēts, ka vidējā novirze bija 1.5%, nevienam atsevišķam mērījumam nepārsniedzot 3.7%. Šīs vērtības ir zem vispārpieņemtās $\pm 5\%$ robežas kvantitatīvajām analīzēm, apliecinot, ka VAA metode reproducē UV/VIS rezultātus ar minimālu sistematisko kļūdu. Šie rezultāti apstiprina metodes ticamību, nodrošinot precīzus rezultātus kopējo fenolu satura noteikšanai augu eļļās un var tikt izmantota, kā alternatīva tradicionālajai UV/VIS spektrofotometrijai.

7. Korelācijas matricas analīze, balstoties uz veikto analīžu rezultātiem

Korelācijas matricas analīze nodrošina detalizētu kvantitatīvu ieskatu fizikāli ķīmisko parametru savstarpējā mijiedarbībā dažādu augu eļļu sastāvā, izmantojot krāsu intensitātes karti. Korelācijas matricas intensitātes kartē (10 att.) ir ietverti un savstarpēji salīdzināti šādi iepriekšējo analīžu rādītāji: krāsas skaitlis (CN), kopējo fenolu saturs (TPC), radikāļu neitralizēšanas aktivitāte (RSA) un Toņa vērtība (H), kas atspoguļo augu eļļas fluorescences krāsu. Statistiski nozīmīga korelācija pastāv starp krāsas skaitli (CN) un kopējo fenolu saturu (TPC) ($r = 0.88$, $p < 0.05$), kas norāda, ka fenola savienojumi būtiski ietekmē eļļas krāsu. Statistiski nozīmīga ir arī CN un radikāļu neitralizēšanas aktivitātes (RSA) korelācija ($r = 0.72$, $p < 0.05$), kas liecina par pigmentu saistību ar antioksidatīvām īpašībām. CN un Toņa vērtības (H) korelācija ($r = 0.61$, $p < 0.05$) ir statistiski nozīmīga, uzsverot atšķirības starp redzamās gaismas un fluorescences spektriem.



CN – Krāsas skaitlis / *Colour Number*, TPC – Kopējo fenolu saturs / *Total phenolic content*, RSA – Radikāļu neitralizēšanas aktivitāte / *Radical scavenging activity*, H – Toņa vērtība / *Hue value*

10. att. **Veikto analīžu korelācijas matricas intensitātes karte /**
Fig. 10. Heatmap of the correlation matrix for the analyses performed

Statistiski nozīmīga ir arī korelācija starp RSA un TPC ($r = 0.72$, $p < 0.05$), kas apstiprina fenola savienojumu ietekmi uz antioksidatīvajām īpašībām. Savukārt, RSA un H korelācija ($r = 0.15$, $p > 0.05$) ir vāja, norādot uz praktiski neesošu saistību starp antioksidatīvajām un fluoriscentajām īpašībām.

8. Algoritma izstrāde Python programmēšanas valodā

Izstrādātais algoritms ļauj viedtālrunī iegūtos attēlu datus RGB krāsu sistēmā pārveidot par absorbciju, iegūt kalibrācijas līknes kopējo fenolu satura noteikšanai un aprēķināt analizējamo augu eļļu paraugu kopējo fenolu satura koncentrāciju un radikāļu neitralizēšanas aktivitāti. Šādu atvērtā tipa programmu var izmantot ar datorā instalētu Python izstrādes vidi (piemēram, IDLE Python 3.11) vai arī tiešsaistes programmēšanas rīku Kaggle (<https://www.kaggle.com>). Kaggle vides priekšrocība ir tā, ka nav nepieciešama Python programmatūra Windows, iOS, Linux vai citās operētājsistēmās. Salīdzinot ar MS Excel, Python programmēšanas valodai ir vairākas priekšrocības, jo tā ļauj veikt sarežģītākus aprēķinus, piedāvā plašu klāstu specializētu bibliotēku, kas paredzētas zinātnisko datu sarežģītiem algoritmiem, aprēķiniem un analīzēm (piemēram, NumPy,

SciPy, Pandas), atbalsta lielāku datu apjomu, piedāvā augstāku reproducējamību, ļaujot automatizēt aprēķinu procesus, kā arī to var integrēt citās programmēšanas vidēs, piemēram, C++, Java, HTML, vai arī Android un iOS lietotnēs.

Lai gan pastāv citas līdzvērtīgas programmēšanas valodas, piemēram, R un RStudio, kuras arī tiek izmantotas datu analīzei, statistikai un var integrēties citās programmēšanas valodās, Python priekšrocības ir tā elastība, ievērojams bibliotēku klāsts un plašāks pielietojums zinātniskajās jomās, kas saistītas ar lieliem datu apjomiem, sarežģītiem algoritmiem, kā arī spēcīgs atbalsts mašīnmācīšanās un mākslīgā intelekta jomās.

8.1. Python algoritms viedtālrunā attēlu analīzei kopējo fenolu satura noteikšanai augu eļļās

Ja lietotājam nav iespējas ievietot minēto Python algoritma kodu Python izstrādes vidē (IDLE Python 3.11), tad pastāv iespēja ievietot šo kodu tiešsaistes programmēšanas rīka Kaggle (<https://www.kaggle.com>) vidē.

Viedtālrunā attēlu analīzē RGB krāsu sistēmā kopējo fenolu satura noteikšanai augu eļļās tika izmantoti sekojošie Python koda algoritma struktūras posmi: 1) izmantotās bibliotēkas; 2) lietotāja datu ievade un apstrāde; 3) absorbcijas aprēķini; 4) lineārā regresija un kalibrācijas līkņu zīmēšana; 5) analizējamo augu eļļu paraugu datu analīze, kas saistīta ar kopējo fenolu satura noteikšanu; un 6) iegūto rezultātu datu saglabāšana MS Excel faila formātā. Python izstrādātā algoritma pilnā koda lejupielādes tiešsaistes resurss ir dots pētījuma V posma aprakstā.

Lai noteiktu kopējo fenolu saturu augu eļļās, izmantojot Python algoritmu, tiek importētas nepieciešamās bibliotēkas, ieskaitot NumPy, Pandas, Matplotlib un SciPy. Lietotājs ievada nepieciešamos datus, piemēram, koncentrācijas vienības, I_0 vērtību un kalibrācijas punktu skaitu. Absorbcijas aprēķini tiek veikti katram krāsu kanālam (R, G, B) un apvienotajiem kanāliem (RGB, RG, RB, GB). Izmantojot lineārās regresijas analīzi, tiek aprēķinātas kalibrācijas līknes un attēlotas grafiski. Rezultāti tiek analizēti un saglabāti MS Excel formātā. Algoritms ir izveidots tā, lai lietotājs varētu ievadīt datus, kas pēc tam tiek pārveidoti par NumPy masīviem efektīvākai datu apstrādei.

Izstrādātais Python koda algoritms var tikt izmantots ne tikai augu eļļu kopējo fenolu satura noteikšanai, izmantojot viedtālrunī iegūtu attēlu analīzi, bet arī citu augu vai ķīmisku vielu analīzēs, kurās tiek izmantoti gaismas jutīgie sensori, kas spēj noteikt RGB krāsu sistēmu.

8.2. Python algoritms viedtālruņa attēlu analīzei radikāļu neitralizēšanas aktivitātes noteikšanai augu eļļās

Viedtālruņa attēlu analīzē RGB krāsu sistēmā radikāļu neitralizēšanas aktivitātes noteikšanai augu eļļās izmantoti šādi Python koda algoritma struktūras posmi: 1) nepieciešamie moduļi un bibliotēkas; 2) lietotāja datu ievade un apstrāde; 3) absorbcijas aprēķini; 4) analizējamo augu eļļu paraugu datu analīze, kas saistīta ar radikāļu neitralizēšanas aktivitātes noteikšanu; un 5) iegūto rezultātu datu saglabāšana MS Excel faila formātā. Python izstrādātā algoritma pilnā koda lejupielādes tiešsaistes resurss ir dots pētījuma V posma aprakstā.

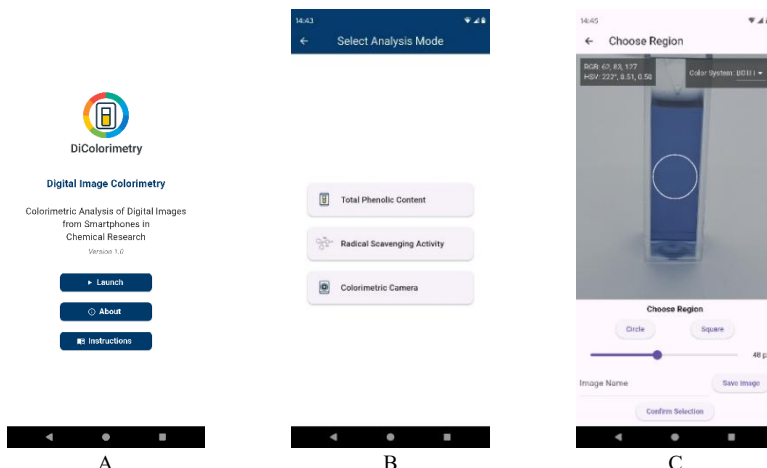
Lai noteiktu radikāļu neitralizēšanas aktivitāti augu eļļās, izmantojot Python algoritmu, tiek importēti math modulis un Pandas bibliotēka. Lietotājs ievada IO, IDPPH vērtības un analizējamo paraugu skaitu. Absorbcijas vērtības tiek aprēķinātas katram krāsu kanālam (R, G), un tiek veikti nepieciešamie matemātiskie aprēķini. Iegūtie rezultāti tiek izvadīti lietotājam un saglabāti MS Excel formātā. Algoritms nodrošina strukturētu pieeju datu ievadei un apstrādei, nodrošinot precīzus un viegli interpretējamus rezultātus. Izstrādātie algoritmi paver jaunas iespējas inovatīvai zinātniskai pētniecībai un ķīmisko vielu analīzei.

9. Viedtālruņa lietotnes *DiColorimetry* funkcionālo iespēju novērtējums

Lai paplašinātu Python programmēšanas valodā izstrādātā algoritma pielietojumu un nodrošinātu tā pieejamību arī viedtālruņa ierīcēs, tika izstrādāta lietotne *DiColorimetry* (11.att., A). Tās mērķis ir nodrošināt lietotājam intuitīvu un funkcionāli pilnvērtīgu vidi kopējo fenolu satura un radikāļu neitralizēšanas aktivitātes kvantitatīvai noteikšanai, izmantojot viedtālruņa attēlu datus RGB krāsu sistēmā.

Lietotne izstrādāta, izmantojot Flutter izstrādes vidi, kas balstīts uz Dart programmēšanas valodu. Šī izvēle nodrošina modernu un vizuāli vienotu grafisko lietotāja saskarni vairākās platformās. Sistēmas arhitektūra apvieno Flutter izveidoto lietotāja interfeisu ar Python algoritma integrāciju, kas darbojas kā analītiskais modulis. Šis modulis nodrošina datu apstrādi un kvantitatīvo analīzi tieši viedtālruņa ierīcē, neizmantojot ārējas datu apstrādes platformas.

Lietotne sastāv no trim galvenajiem analītiskajiem režīmiem: *Total Phenolic Content*, *Radical Scavenging Activity* un *Colorimetric Camera* (11.att., B). Katrs režīms ietver trīs loģiski secīgus posmus: datu sagatavošanu, paraugu analīzi un rezultātu vizualizāciju. Kalibrācijas dati lietotnē ievadāmi manuāli vai iegūstami no attēliem ar paraugiem, no kuriem automātiski tiek iegūtas RGB vērtības. Tālāk šie dati tiek pārvērsti absorbcijā un koncentrācijās, izmantojot lineārās regresijas modeli. Iegūtie rezultāti tiek attēloti tabulu veidā, un tos ir iespējams eksportēt CSV formātā turpmākai analīzei.



A – Sākuma ekrāns / Home screen, B – Instrukciju izvēle / Instruction selection, C – Analīzes apgabala manuāla izvēle uz attēla (aplis/kvadrāts) un krāsu koordinātu (RGB/HSV) priekšskatījums / Manual selection of analysis area (circle/square) on the image with RGB/HSV colour preview

11. att. Lietotnes *DiColorimetry* sākuma ekrāns, analīzes režīma izvēles struktūra un kolorimetriskās kameras režīma darbības posms /
Fig. 11. Start screen of the DiColorimetry application, structure of the analysis mode selection, and the operational stages of the colorimetric camera mode

Kolorimetriskās kameras režīms nodrošina paplašinātu funkcionalitāti, ļaujot analizēt attēlu krāsu informāciju gan RGB, gan HSV krāsu sistēmās (11.att., C). Lietotājs var izvēlēties analizējamo noteikšanas reģionu tieši no attēla – apla vai kvadrāta formā. Atšķirībā no TPC un RSA režīmiem, kuros iespējama tikai RGB datu apstrāde, šis režīms ir piemērots plašākam pielietojumam, tostarp eksperimentālai metodoloģiju izstrādei un ķīmiskajām analīzēm dažādos matricēs paraugos. Lietotne *DiColorimetry* nodrošina augstu lietošanas pieejamību un precīzu datu apstrādi viedtālruna vidē, vienlaikus piedāvājot iespējas datu eksportam un to tālākai analīzei zinātniskās pētniecības nolūkos. Tā paver jaunas iespējas jaunu metožu izstrādei analītiskajā ķīmijā.

SECINĀJUMI

1. Analizējot peroksīda, skābes un joda skaitļus, tika konstatēts, ka eksperimentos izvēlētais augu eļļas atbilst svaigu eļļu kvalitātes rādītājiem un izmantojamas kolorimetrijas pētījumos.
2. Izvērtējot optimālo distanci attēla un RGB krāsu sistēmas iegūšanai, tika konstatēts, ka attālums 12.0 ± 0.1 cm ir vispiemērotākais. Palielinot attālumu, noteikšanas robežas kļūst mazāk precīzas attiecībā uz kivešu laukumu, savukārt samazinot attālumu, novērojama objektīva grūtāka fokusēšana.

3. Kolorimetriskai krāsas skaitļa noteikšanai izmanto visu RGB krāsu sistēmu, jo augu eļļa var veidot ne tikai tai raksturīgo dzelteno krāsu, bet arī zaļu un sarkanu, tādēļ nevar ņemt vērā tikai primāro un sekundāro krāsu apli.
4. Izmantojot fluorescējošo gaismu, pētītās augu eļļas var iedalīt sešos hierarhijas klasteros pēc to Toņa iegūtajām vērtībām: sarkanā, zilā, ciāna, zaļā un dzeltenā.
5. Radikāļu neitralizēšanas aktivitātes noteikšanā, izmantojot RGB krāsu sistēmas RG (sarkanās–zaļās) vērtības, tika iegūti līdzīgi rezultāti kā ar UV/VIS spektrofotometrijas metodi, ar statistiski nenozīmīgām atšķirībām, parādot šīs metodes potenciālu kā piemērotu alternatīvu klasiskajām analīzes metodēm.
6. Radikāļu neitralizēšanas aktivitātes novērtēšanā tika noteikts, ka metodes vidējā atkārtojamība ir 2.3%, bet maksimālā 3.0%, savukārt vidējā precizitāte ir 0.7%, bet maksimālā 4.4%. Iegūtā relatīvā standartnovirze (%RSD) 0.8% ir tuvu zemākajai literatūrā norādītajai vērtībai spektrofotometrijā, apliecinot metodes piemērotību un ticamību rezultātu iegūšanā dažādos augu eļļu paraugos.
7. Kopējo fenolu satura analīzē, izmantojot galluskābes kalibrācijas līkni, tika iegūti determinācijas koeficienti sarkanajai (R) krāsai $R^2 = 0.9988$, zaļajai (G) $R^2 = 0.9938$ un zilajai (B) $R^2 = 0.9752$. Sarkanās (R) un zaļās (G) krāsas sistēmas uzrādīja līdzīgu determinācijas koeficientu kā UV/VIS spektrofotometrija ($R^2 = 0.9977$).
8. Kopējo fenolu satura metodes novērtējumā, tika iegūti augsti precizitātes, atkārtojamības un ticamības rādītāji, ar determinācijas koeficientu (R^2) sarkanajai krāsai 0.9988, noteikšanas (LOD) un kvantificēšanas (LOQ) robežām attiecīgi 1.25 mg L^{-1} un 3.80 mg L^{-1} , apstiprinot šīs metodes piemērotību un salīdzināmību ar klasisko UV/VIS spektrofotometriju.
9. Kopējo fenolu satura novērtēšanā tika konstatēts, ka metodes vidējā atkārtojamība ir 1.9, bet maksimālā $3.3 \text{ mg GAE kg}^{-1}$ eļļas, savukārt vidējā precizitāte ir 1.5, bet maksimālā $3.7 \text{ mg GAE kg}^{-1}$ eļļas. Iegūtā relatīvā standartnovirze (%RSD) 0.7% ir tuvu zemākajai literatūrā norādītajai vērtībai spektrofotometrijā, apliecinot metodes piemērotību un ticamību rezultātu iegūšanā dažādos augu eļļu paraugos.
10. Python programmēšanas valodā ir izstrādāti kopējo fenolu satura un radikāļu neitralizēšanas aktivitātes noteikšanas algoritmi, kas integrēti viedtālruna lietotnē *DiColorimetry*.
11. Promocijas darba pētījumā iegūtie rezultāti apstiprina izvirzīto hipotēzi, ka viedtālruna attēlu analīze un kolorimetrisko metožu integrācija ir ilgtspējīga alternatīva klasiskajām optiskās analītiskās ķīmijas metodēm augu eļļu novērtēšanā.

TOPICALITY OF THE RESEARCH

Healthy and safe food is one of the essential factors ensuring quality of life. Therefore, the study and practical application of natural substances have always been significant in the economy (Zeb, 2021). To assess the quality of oils in production or research, traditional methods, such as spectrophotometry, are commonly used. However, with the advancement of technology, the use of smartphones has become increasingly accessible and popular as an alternative to chemical analyses in both the food and medical industries, offering broader and more convenient possibilities for conducting analyses (Zeb, 2021; Hassanien, 2023).

The use of smartphone image analysis in chemical analyses offers several advantages: 1) they are portable, making them suitable for use in various locations outside of laboratory settings; 2) they can be more cost-effective, as the purchase cost of a smartphone is generally lower than that of chemical analysis equipment; 3) there are no significant expenses associated with equipment maintenance and calibration; 4) it is easy to use and operate without requiring specialized knowledge, thereby complementing the range of classical analysis equipment and methods (Bazani et al., 2021).

Given the growing interest in the application of such technology in analytical chemistry, this method may also be potentially useful for the investigation of the colorimetric properties of vegetable oils. The colour of vegetable oils is closely linked to their antioxidant properties. Antioxidants are substances that help prevent or reduce oxidation processes, which affect the quality and shelf life of vegetable oils. These processes can lead to changes in sensory properties, resulting in unpleasant odours and tastes, and can also reduce the nutritional value of vegetable oils. Many antioxidants, such as carotenoids, tocopherols, flavonoids, and phenolic compounds, are pigments that can directly influence these processes (Ramadan, 2020).

Despite the potential advantages, there are also limitations; for instance, the smartphone camera and light-sensitive sensors may affect the accuracy of the analysis. Additionally, it is important to note that the use of smartphones in chemical analysis is a relatively new method, and further research is needed to compare its results with those of traditional analysis methods (Nguyen et al., 2022).

The **hypothesis** of the thesis: smartphone image analysis and the integration of colorimetric methods represent a sustainable alternative to classical optical analytical chemistry methods for the evaluation of vegetable oils.

The hypothesis of the thesis has been confirmed by the **defended thesis**.

1. Determining the optimal distance for the smartphone camera ensures accurate representation and analysis of RGB colour system values.

2. Smartphone image analysis enables the determination of colorimetric colour numbers and fluorescence analysis of vegetable oils.
3. The colorimetric method based on smartphone image analysis using the RGB colour system provides the determination of radical scavenging activity and total phenolic content in vegetable oils, showing comparable results with UV/VIS spectrophotometry.
4. The Python programming language is suitable for developing algorithms for digital image analysis in the RGB colour system, enabling automated data processing and allowing the developed solutions to be adapted for use in a smartphone application.

The **aim** of the thesis is to develop and test a methodology for integrating smartphone image analysis with colorimetric methods for the evaluation of vegetable oils.

The following **tasks** were set to achieve the aim of the thesis:

1. to investigate the optimal distance for the smartphone camera that ensures accurate acquisition and analysis of RGB colour system values;
2. to develop a smartphone image analysis method for determining the colorimetric colour number in the analysis of various vegetable oils;
3. to conduct a colorimetric analysis of vegetable oil fluorescence using the RGB and HSV colour systems, based on Hue values;
4. to compare the results of smartphone image analysis with those of UV/VIS spectrophotometry in determining the radical scavenging activity of vegetable oils using the RGB colour system;
5. to evaluate the smartphone image analysis method for determining total phenolic content in vegetable oils using the RGB colour system, and to compare the obtained results with those of the UV/VIS spectrophotometry method;
6. to develop and use algorithms created in the Python programming language to automate the speed of data processing and analysis of digital images, integrating the evaluated methods into a unified system and ensuring their adaptation for a smartphone application.

The **novelty** of the thesis:

1. for the first time, the integration of colorimetric methods for determining radical scavenging activity, total phenolic content, fluorescence colorimetric analysis, and colour number determination in vegetable oils using smartphone image analysis has been studied;
2. algorithms for determining total phenolic content and radical scavenging activity have been developed in the Python programming language. These algorithms are integrable into the smartphone application *DiColorimetry* and are intended for colorimetric analysis of digital images in the RGB colour system.

The **economic significance** of the thesis.

1. The use of smartphone image analysis methods in the evaluation of vegetable oils promotes the development of innovations by creating new, more efficient solutions for conducting analytical measurements, and fosters technological advancement and application across various production sectors.
2. By integrating algorithms developed in Python into the quality control of vegetable oils, laboratories can automate data acquisition and analysis, as well as improve data management.
3. Smartphone cameras and their customisable software enable image analysis in the RGB and HSV colour systems to examine the presence of both colour pigments and antioxidants. Existing studies on food matrices indicate a high degree of accuracy in antioxidant property determination using smartphone image analysis, demonstrating good linearity and precision in comparison with classical methods.

APPROBATION OF THE RESEARCH WORK

Research results are published in 5 scientific journals indexed in SCOPUS and Web of Science databases. The **research results have been presented at the 6th international scientific conferences, congresses and symposiums** in Latvia, Israel, Switzerland, Macedonia.

As a result of the research, **2 algorithms** and **1 smartphone application** were developed and registered in the Zenodo repository – an open science platform maintained by CERN (European Organization for Nuclear Research) in collaboration with the OpenAIRE project and supported by the European Commission – obtaining Digital Object Identifiers (DOIs).

The research results have been presented at the international food industry exhibitions "Riga Food 2020" and "Riga Food 2021," as well as at the invention and innovation festival "MINOX Zemgale 2020." Additionally, an article on the determination of total phenolic content using smartphone image analysis was published on the international media platform "Devdiscourse" on 29 May 2024, with the title: "Bringing Lab to Your Pocket: Smartphone-Based Method for Measuring Phenolic Compounds in Vegetable Oils."

The study of PhD thesis was financially supported by:

European Social Fund project No. 8.2.2.0/18/A/014 "Improvement of LLU academic staff" and LLU project "Strengthening Research Capacity in the LLU". Project "Using a smartphone for the determination of biologically active compounds in vegetable oils", Project No. 3.2.-10/126, Z46.

NACIONĀLAIS
ATTĪSTĪBAS
PLĀNS 2020



EIROPAS SAVIENĪBA
Eiropas Sociālais
fonds



Latvijas
Lauksaimniecības
universitāte

IEGULDĪJUMS TAVĀ NĀKOTNĒ

Zinātniskās kapacitātes stiprināšana LLU

MATERIALS AND METHODS

Time and place of the research

The research was developed in Latvia from 2019 to 2025 in the laboratories of the Food Institute (former Faculty of Food Technology) at the Latvia University of Life Sciences and Technologies (former Latvia University of Agriculture) and in the Agrochemical Laboratory of the State Plant Protection Service at the Ministry of Agriculture.

Research object - 40 different vegetable oils in glass packaging were purchased from retail outlets in Latvia. The selected vegetable oils and their characteristics are summarized in Table 1.

A Huawei P30 Lite smartphone (2019 model, Huawei Technologies Co. Ltd., China) with the Android operating system was used to capture digital images in the RGB colour system.

The structure of the research

The research was conducted in five stages, and the main stages are summarized in Table 2.

In Stage I of the research - Determination of quality indicators in vegetable oils - selected vegetable oils were assessed for their quality. Stage I of the research includes 2 steps.

In 1st step, vegetable oils available in the retail network in Latvia were purchased, delivered to the laboratory, and stored under refrigeration at $+3 \pm 1$ °C until further analysis.

In 2nd step, the quality indicators of vegetable oils were determined using the following methods: Determination of acid value and acidity (LVS EN ISO 660:2020), Determination of peroxide value and calculation of mass of active oxygen (LVS EN ISO 3960:2017), and Animal and vegetable fats and oils - Determination of iodine value (LVS EN ISO 3961:2018).

To determine the distance required for capturing smartphone images, **Stage II of the research – Determining the optimal distance for image acquisition** - includes 3 steps.

In 1st step, the Huawei P series smartphone, P30 Lite, which won the TechRadar Mobile Choice Consumer Award in 2019 (TechRadar Mobile Choice Consumer Awards (MCCA)), was selected for the research.

In 2nd step, a polyvinyl chloride photo studio box (Photo Studio Box Puluz, Puluz Technology Ltd., China) with an open front and dimensions of 24 cm x 23 cm x 22 cm was purchased from retail for analysis.

In 3rd step, to determine the optimal distance for image acquisition, the Huawei P30 Lite smartphone was positioned horizontally in front of the open side of the photo studio box at distances of 9, 10, 11, 12, 13, 14, and 15 cm from 2.5 mL disposable macro cuvettes (BrandTech Scientific, Inc., USA) containing

calibration solutions, comparison solutions, and vegetable oil samples. The colorimetric analysis was conducted according to Figure 1.

To conduct the colorimetry studies required for smartphone image acquisition, **Stage III of the research - Colorimetry studies using Smartphone image analysis** - includes 2 steps.

In 1st step, Colorimetric determination using smartphone image analysis, the colorimetry method is based on determining the visible light colour in vegetable oils through the analysis of images obtained with a smartphone. To determine the hue in vegetable oils, they were compared with iodine calibration solutions prepared according to the GOST 5477-2015 method (GOST 5477, 2015), and expressed as a colour number.

In 2nd step, Colorimetric analysis of vegetable oil fluorescence, the fluorescence colorimetric analysis method is based on the fluorescence of vegetable oils, using a 390 nm LED light spectrum and image analysis obtained with a smartphone.

Stage IV of the research - Determination of radical scavenging activity and Total phenolic content using smartphone image analysis – includes 2 steps.

In 1st step, the following were determined for vegetable oils: **1. radical scavenging activity**, based on the method of determining radical scavenging activity in vegetable oils through smartphone image analysis using the red, green, and blue (RGB) colour system. Radical scavenging activity is expressed as the percentage of DPPH radical inhibition (RSA); **2. total phenolic content**, based on the method of determining total phenolic content in vegetable oils through smartphone image analysis using the red, green, and blue (RGB) colour system.

In 2nd step, the method for determining total phenolic content was evaluated, and a statistical analysis was performed, involving the use of red colour (R) values obtained from smartphone images during the analysis. The linearity of the calibration curves was assessed by applying a regression model to the data points used. The slope, intercept, and their respective errors for each calibration curve were calculated. The fit was evaluated using the coefficient of determination (R^2), and an F-test was additionally performed to compare the two calibration models and determine the best fit. The limits of detection (LOD) and quantification (LOQ) were calculated using the calibration curves and their resulting equations, thereby determining the lowest possible detection concentration and the lowest concentration that can be accurately quantified. The method's precision and repeatability were assessed by analysing vegetable oil samples in 10 replicates. The relative standard deviation (%RSD) was calculated to evaluate the variability of the measurements.

Development of the algorithm in the Python programming language and its integration into a smartphone application, Stage V of the research includes 2 step.

In 1st step The algorithm for determining total phenolic content and radical scavenging activity (RSA) is based on the use of the Python programming language, allowing RGB colour system data obtained from a smartphone to be input and processed in Microsoft Windows 10 and 11, as well as in web browser environments such as Kaggle (<https://www.kaggle.com>).

The developed Python algorithms are available in the web application for the smartphone image analysis project: <https://github.com/SanitaVucane/Analysis-of-Smartphone-images-in-RGB-colour-system>⁴ and <https://github.com/SanitaVucane/Determination-of-radical-scavenging-activity-using-smartphone-image-analysis>⁵.

They were also registered in the Zenodo repository—a scientific platform maintained by CERN in collaboration with the OpenAIRE project and supported by the European Commission—obtaining Digital Object Identifiers (DOIs): <https://doi.org/10.5281/zenodo.15225435> and <https://doi.org/10.5281/zenodo.15229741>

In 2nd step, includes the development of the smartphone application DiColorimetry, which is based on the open-source Flutter framework (developed by Google), built on the Dart programming language, and integrates previously developed Python algorithms.

Zenodo, CERN. <https://doi.org/10.5281/zenodo.15328506>.

Statistical Data Processing Methods

Data processing was performed using methods of mathematical statistics. The obtained results were used to calculate arithmetic means, relative standard deviation (%RSD), t-tests, and cluster analysis using the hierarchical method, where object classification was performed according to Ward's method, using the IBM SPSS Statistics software package (version 23.0.0.0, George & Mallery 2016). The statistical processing and correlation analysis of total phenolic content and radical scavenging activity were carried out using the Python programming language (version 3.11, Windows 10) and the Kaggle web application, which allows for the exploration and development of Python models in a web environment (<https://www.kaggle.com>).

⁴ Determination of total phenols in Vegetable oils
<https://github.com/SanitaVucane/Analysis-of-Smartphone-images-in-RGB-colour-system> : Resurss skatīts 2024. gada 15. augustā.

⁵ Determination of Radical Scavenging Activity
<https://github.com/SanitaVucane/Determination-of-radical-scavenging-activity-using-smartphone-image-analysis> Resurss skatīts 2024. gada 15. augustā.

RESULTS AND DISCUSSION

1. Quality indicators of vegetable oils

To determine the freshness of vegetable oils, quality indicators such as peroxide, iodine, and acid values were measured, as well as their impact on the oil's quality and freshness. The peroxide value characterises the amount of oxygen bound in the form of peroxides in the oil, indicating the oil's freshness and the progression of spoilage. It was found that the peroxide values of commercially purchased oils ranged from 1.1 ± 0.1 mEq O₂ kg⁻¹ in rapeseed oil group to 5.1 ± 0.1 mEq O₂ kg⁻¹ in sea buckthorn oil group. The *Codex Alimentarius* standard stipulate that the peroxide value for fresh unrefined vegetable oils should be up to 15 mEq O₂ kg⁻¹.

The active oxygen content in vegetable oil groups varies from 8.8 ± 0.4 mg kg⁻¹ in rapeseed oil group to 39.2 ± 0.1 mg kg⁻¹ in sea buckthorn oil group. This indicates that oils with lower active oxygen content, such as rapeseed and corn oils, will have a longer shelf life.

The linseed oil group exhibited the highest iodine value, 185 ± 1 g 100 g⁻¹, while the olive oil group showed the lowest, 87 ± 1 g 100 g⁻¹. The *Codex Alimentarius* standards specify that the iodine value of linseed oil should be between 170 and 211 g 100 g⁻¹. The iodine value primarily characterises the amount of unsaturated fatty acids in the oil, but as the number of double bonds decreases, it also allows the determination of the oil's oxidation level and its impact on quality.

The acid value indicates the amount of free acids in the fats, which affects the storage time and quality of the oil. The acid value of the studied oil groups ranged from 1.3 ± 0.1 mg KOH g⁻¹ in rice bran oil group to 2.5 ± 0.1 mg KOH g⁻¹ in sea buckthorn oil group. The *Codex Alimentarius* standard stipulate that the acid value for unrefined oils obtained by cold pressing should not exceed 4.0 mg KOH g⁻¹.

The research found that all selected vegetable oils meet the quality criteria for fresh oils as specified in the *Codex Alimentarius* standards, and therefore can be used in further colorimetric research.

2. Determining the optimal distance for image acquisition

To determine the optimal distance from the smartphone camera lens for image capture and maximum colour accuracy, vegetable oils was used, placed in a PS 2.5 mL disposable macro cuvette. The macro cuvette was placed in the photo studio box. Using the X-Rite ColorChecker colour panel, which is used for capturing colour and balance in professional camera images and videos

(Hunt & Pointer 2011), it was found that the yellow colour values in the RGB colour system were 185, 151, 18 pixels (px), or RGB (185, 151, 18) (Fig. 2).

For rapeseed oil, which was selected as the basis for visual comparison (Fig. 3), the optimal distance from the smartphone camera lens to the object under analysis was determined to be 12.0 ± 0.1 cm, with corresponding RGB values of 178, 152, 31 pixels. These values most closely match those of the yellow colour panel on the X-Rite ColorChecker (Fig. 2) (RGB: 185, 151, 18 pixels), indicating the most accurate colour representation at this specific distance.

As shown in Fig. 3, the detection region varies with the smartphone's distance, affecting the numerical values of the RGB colour system. An evaluation of the average RGB values for the remaining nine vegetable oil groups revealed a similar tendency regarding distance and colour intensity.

For all vegetable oils, an increase in RGB values was observed at distances exceeding 12.0 ± 0.1 cm, which can be explained by the colours - particularly green (G) and blue (B) - shifting towards white (RGB: 255 pixels). As shown in Fig. 3, at a distance of 15.0 ± 0.1 cm, the boundaries of the detection region extend beyond the cuvette area (example: rapeseed oil), thus incorporating the white background of the photo studio into the calculation. This inclusion contributes to the RGB values approaching the maximum of 255 pixels.

Conversely, at distances shorter than 12.0 ± 0.1 cm, a decrease in RGB values was observed across all vegetable oil groups, particularly in the G and B channels, indicating a trend towards black (RGB: 0 pixels). This phenomenon can be explained by the reduced amount of transmitted light due to the shorter distance between the lens and the sample, resulting in diminished colour intensity and image clarity. Under such conditions, the LED lighting is more readily absorbed, and the smartphone camera struggles to maintain accurate focus, which negatively affects the reliability of RGB value acquisition.

For vegetable oils with darker or more saturated tones, such as sea buckthorn and hemp oils - whose initial RGB values (at 12 cm) are already lower, a more pronounced decrease in RGB values is observed at closer distances. This indicates significant differences in light transmittance among the various samples. In contrast, lighter oils, such as rice or sunflower oils, exhibit a smaller reduction in RGB values, thereby maintaining relatively high colour accuracy.

Based on the obtained results, it was concluded that the optimal distance for accurate colour value determination for all analysed vegetable oil samples is 12.0 ± 0.1 cm. At this distance, a clear and balanced colour spectrum is achieved, which most accurately reflects the actual colours while avoiding overly bright (due to white background interference) or overly dark (due to light absorption) tones. The calculated t-value ($p < 0.001$) confirms that, at a 95% confidence level, there are statistically significant differences between the distance from the smartphone lens to the sample and the obtained RGB colour system values.

As shown in Fig. 3, the range of the detection region varies depending on the distance from the smartphone, which affects the numerical values of the RGB system.

To determine how the specified distance affects black or white colour, the X-Rite ColorChecker colour panel was used. The calculated t-values for white (3.69, $p > 0.05$) and black (0.12, $p > 0.05$) indicate that, at a 95% confidence level, there are no statistically significant differences between the distances from the smartphone lens and the X-Rite ColorChecker colour panel for black and white colours.

Therefore, it can be concluded that a distance range of 9.0 ± 0.1 to 15.0 ± 0.1 cm does not affect changes in white or black colours, as there are no obstacles to light reaching the lens. Such changes could be influenced by the object being studied, which absorbs a certain amount of light, or by the fact that the boundaries of the detection region are outside the area of the analysed object in the cuvettes, thus also considering the background colour used, which introduces an error in capturing the true colour.

3. Colorimetric determination using smartphone image analysis

To determine the colour number in the RGB colour system, digital imaging of an iodine calibration solution was employed, demonstrating changes depending on the solution concentration. The results were expressed as a colour number ranging from 0 to 100 for the iodine calibration solution, based on the intensity of the red (R), green (G), and blue (B) colour channels (Fig. 4).

Significant changes in the colour number of the iodine calibration solution were observed in the green (G) and blue (B) colours. Changes in the green colour (G) were noted throughout the colour number curve, while the intensity of the blue colour rapidly decreased from 158 to 20 pixels. This drop in blue intensity is associated with the increase in yellow intensity as the iodine concentration in the solution increases. The decrease in blue is expected, as this colour does not contribute to the formation of yellow, which is a secondary colour resulting from the mixing of red and green. The study found that the intensity of the red colour remained practically unchanged across all iodine standard solutions.

Vegetable oils can contain not only yellow but also green pigments, such as chlorophyll, which is found in hemp or olive oil. Therefore, to obtain a more accurate colorimetric spectrum of vegetable oils, the average RGB ($RGB_{\text{vid}} / \text{avg}$) value of all three colours (red, green, blue) was calculated. This average colour value was then converted to absorbance according to the Beer-Lambert equation, and the iodine solution calibration curve was obtained, expressed as a colour number. The obtained colour number values for the vegetable oils are shown in Figure 5.

The highest colour number was observed in the hemp ($42.0 \pm 0.1 - 46.2 \pm 0.1$) and olive ($41.3 \pm 0.1 - 45.2 \pm 0.1$) oil groups, while the lowest was found in the linseed ($3.8 \pm 0.1 - 4.2 \pm 0.1$), grape ($4.2 \pm 0.1 - 4.6 \pm 0.1$), corn ($4.9 \pm 0.1 - 6.2 \pm 0.1$), rice bran ($4.5 \pm 0.1 - 7.2 \pm 0.1$), and sunflower ($7.0 \pm 0.1 - 7.8 \pm 0.1$) oil groups. A moderate colour number was identified in the milk thistle ($14.2 \pm 0.1 - 15.3 \pm 0.1$), rapeseed ($14.2 \pm 0.1 - 16.3 \pm 0.1$), and sea buckthorn ($15.0 \pm 0.1 - 23.3 \pm 0.1$) oil groups (Fig. 5). The smartphone used detected the three primary colours found in nature - red, green, and blue (Pi et al., 2022). Since white is formed by the mixture of all three primary colours - red (R), green (G), and blue (B) - white was used as the background for capturing images with the smartphone (Colour code (px) = (255, 255, 255)).

The pixel value range for each primary colour is from 0 to 255, and the white colour should have a value of 255 pixels. Using the PULUZ photo studio with light-emitting diodes (LED), it was found that it was not possible to achieve a completely white colour of 255 pixels. Under LED lighting, 182 pixels were recorded in the RGB colour system. This reduction in pixel values is related to the colour temperature of the LED light used (3200K), which cannot reach the full intensity of white, causing the colour to trend more toward black, or 0 pixels.

The results indicate that hemp and olive oils have a high content of plant pigments and are rich in biologically active substances, such as chlorophylls and carotenoids. Higher chlorophyll content was found in hemp and olive oils ($138.0/2-5 \text{ mg kg}^{-1}$) compared to carotenoids ($33.6/6.0 \text{ mg kg}^{-1}$). It is known that chlorophyll gives a darker colour to the product than carotenoids, which is why the colour number for these oils is higher than for other vegetable oils (Fakourelis et al., 1987; Nikolova et al., 2014). In linseed, grape, rice bran, macadamia nut, corn, and sunflower oils, chlorophyll content is very low (0.30 to 1.79 mg kg^{-1}), while carotenoid content is higher - ranging from 4.32 to 10.6 mg kg^{-1} . Milk thistle and rapeseed oils contain moderate levels of chlorophylls ($1.79 - 6.56 \text{ mg kg}^{-1}$) and carotenoids ($5.02 - 9.57 \text{ mg kg}^{-1}$). According to scientific literature, sea buckthorn oil is considered one of the richest in carotenoids, exceeding 302.8 mg kg^{-1} of oil (Li & Beveridge, 2003; Ramadan, 2020). The variation in colour number values among vegetable oils depends on the quality of the raw materials, the plant variety, and the production technology used.

4. Colorimetric analysis of vegetable oil fluorescence

To obtain Hue values, the smartphone-generated colorimetric digital images in the RGB system must be converted into Hue images using the HSV colour model. While the RGB colour system correlates with the human visual perception, it does not fully represent the entire colour spectrum. Therefore, a colour model that more accurately reflects human colour perception—the HSV (Hue, Saturation, Value) model—is employed. This model has the advantage of

separating achromatic (Value) and chromatic (Hue and Saturation) components (Loesdau et al., 2014). The colour information extracted from RGB images can be used to derive Hue values (Fig. 6), which depict the characteristic fluorescent colours of each vegetable oil.

The hue values indicate substantial differences in fluorescence between olive, hemp, and other commonly encountered vegetable oils, offering a quantitative approach for their analysis. Oils such as olive–hemp, grape–sunflower–rice bran–linseed, and milk thistle–corn exhibit similar Hue values.

The Hue values (Fig. 6) reveal that the ten studied vegetable oil groups possess distinct ranges of colour tones.

According to Fig. 6, olive and hemp oils fall within the red colour range of 330° to 360° , with mean values of $351 \pm 1^{\circ}$ and $350 \pm 1^{\circ}$, respectively. Grape, sunflower, rice bran, and linseed oils lie within the blue range of 210° to 270° , with mean values of $241 \pm 1^{\circ}$, $220 \pm 1^{\circ}$, $210 \pm 1^{\circ}$, and $204 \pm 1^{\circ}$, respectively. Milk thistle and corn oils fall within the cyan range of 150° to 210° , with mean values of $187 \pm 1^{\circ}$ and $186 \pm 1^{\circ}$, respectively. Sea buckthorn oil is located in the green range of 90° to 150° , with a mean value of $144 \pm 1^{\circ}$, while rapeseed oil is within the yellow range of 30° to 90° , with a value of $43 \pm 1^{\circ}$.

The Hue values of the vegetable oils range from 0° to 360° . To determine the colour range of the ten vegetable oil groups based on their fluorescent colours, a hierarchical cluster analysis was performed (Fig. 7). As a result of this analysis, the oils were classified into five clusters:

The strong fluorescence of olive oil is attributed to natural fluorescent molecules such as chlorophylls, tocopherols, pheophytins, phenolic compounds, and their oxidation products. Fluorescence from phenolic compounds in olive oil was detected using excitation in the 362–400 nm range (Tena et al., 2009). Hemp oil contains chlorophylls, phenolic compounds, carotenoids, and tocopherols, which also contribute to strong red fluorescence, similar to olive oil. The red fluorescence indicates a high concentration of chlorophyll compounds in both olive and hemp oils. The colour transition from blue to cyan indicates a decrease in vitamin E (tocopherol) concentration towards cyan, with blue representing the highest concentration of tocopherol and cyan the lowest. The bright green colour of sea buckthorn oil indicates a high carotenoid content (Li & Beveridge, 2003).

5. Determination of radical scavenging activity

In this study, individual and mixed colour values in the RGB colour system were determined to assess the potential for using colorimetric indicators in the measurement of radical scavenging activity (RSA). Using a white background, the mean RGB values should theoretically reach 255 pixels; however, experiments revealed that in a 96% ethanol solution, the average RGB value decreased to 180 pixels. The reduction in pixel range was found to depend on the

concentration and the colour temperature of the light-emitting diodes (LEDs), which was set at 3200 K.

It was observed that values obtained from the blue (B) channel differed from those of the red (R) and green (G) channels. The distinctive sensitivity of the blue (B) channel was demonstrated by combining it with red (R) or green (G) values to form RB and GB combinations, which produced weaker results ($p < 0.05$) compared to other RG values and UV/VIS spectrophotometry across all vegetable oils. Therefore, to obtain more accurate results, B, RB, and GB values should not be used in the calculation of radical scavenging activity in vegetable oils.

2,2-Diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) is a stable free radical capable of accepting hydrogen atoms from antioxidants present in vegetable oils, forming a stable DPPH-H molecule (Lee et al., 2007; Choi et al., 2018). Absorbance decreases as the colour shifts from purple to pale yellow, with corresponding wavelengths ranging from 405 to 520 nm. While DPPH reacts with antioxidants to form a yellow colour, classical UV/VIS spectrophotometry typically measures maximum absorbance at a single wavelength - 517 nm.

In contrast, smartphone image analysis enables simultaneous detection across a broader spectrum of visible light, from 400 to 700 nm. Therefore, it is essential to analyse complementary colours, which are represented in the primary and secondary colour wheel (Fig. 8).

The colour wheel indicates that the complementary colour to violet is orange-yellow (Fig. 8). However, when obtaining digital images using the Android applications “*ColorMeter*” and “*DiColorimetry*,” only the three primary colours - red (R), green (G), and blue (B) can be measured. Therefore, when determining radical scavenging activity, it is necessary to select the primary colour that most closely corresponds to the complementary (i.e., secondary) yellow. As shown in the colour wheel, the primary colour closest to yellow is green. However, to achieve more accurate results, a second primary colour red should also be used, thus forming the RG colour system. By combining red and green, the secondary colour yellow is effectively recreated.

The highest radical scavenging activity was observed in the sample of Portuguese olive oil (OL-PRT), with results of $97.5 \pm 0.3\%$ by UV/VIS spectrophotometry and $97.2 \pm 0.7\%$ via smartphone-based RG colour system image analysis. Similar results were obtained for Greek olive oil (OL-GRC): $96.8 \pm 0.3\%$ (UV/VIS) and $96.4 \pm 0.7\%$ (RG). High activity was also recorded in the Latvian hemp oil (HE-LVA) sample - $95.7 \pm 0.3\%$ (UV/VIS) and $95.5 \pm 0.7\%$ (RG) as well as Latvian milk thistle oil (MI-LVA), with respective values of $94.3 \pm 0.3\%$ and $94.6 \pm 0.6\%$. Comparable values were found in Latvian sea buckthorn oil (SE-LVA): $93.5 \pm 0.3\%$ (UV/VIS) and $93.2 \pm 0.7\%$ (RG).

The lowest radical scavenging activity was observed in Italian corn oil (CO-ITA), with results of $61.5 \pm 0.2\%$ (UV/VIS) and $61.3 \pm 0.6\%$ (RG), as well as in

rice bran oil from the same country of origin (RI-ITA), where values were $67.6 \pm 0.2\%$ and $67.1 \pm 0.6\%$, respectively.

Grouping vegetable oils into categories, each comprising four samples of the same type from different origins, allowed for the assessment of overall trends and the identification of oil types with the highest radical scavenging activity. The results showed that the olive oil group demonstrated the highest radical scavenging activity, regardless of the method used. The average RSA result for the olive oil group by UV/VIS spectrophotometry was $96.5 \pm 0.3\%$, while smartphone-based image analysis using the RG colour system yielded $96.3 \pm 0.7\%$. All four olive oil samples (OL-ITA, OL-ESP, OL-PRT, OL-GRC) exceeded 95% RSA, indicating high internal consistency and confirming the comparability of both methods within this oil group.

The hemp oil group exhibited similarly high RSA values, although with greater variability. The average result for the UV/VIS method was $87.6 \pm 0.3\%$, while the RG-based result averaged $87.5 \pm 0.7\%$. The highest values were observed in the Latvian (HE-LVA) and Lithuanian (HE-LTU) samples (UV/VIS: $95.7 \pm 0.3\%$ and $89.4 \pm 0.3\%$; RG: $95.5 \pm 0.7\%$ and $89.5 \pm 0.7\%$, respectively), whereas the Polish (HE-POL) and German (HE-DEU) samples showed slightly lower RSA values (RG: $84.0 \pm 0.7\%$ and $81.0 \pm 0.7\%$), possibly due to climatic or agrochemical factors.

The milk thistle oil group showed lower RSA values compared to the hemp oil group, with averages of $86.7 \pm 0.3\%$ (UV/VIS) and $87.6 \pm 0.6\%$ (RG). Higher results were obtained from the Latvian (MI-LVA) and Slovenian (MI-SVN) samples, whereas the German (MI-DEU) sample exhibited slightly lower RSA (UV/VIS: $78.7 \pm 0.2\%$; RG: $81.3 \pm 0.6\%$).

The rapeseed oil group showed the widest variability in RSA values. UV/VIS results ranged from $81.0 \pm 0.3\%$ (RA-DEU) to $95.2 \pm 0.3\%$ (RA-SWE), with a group average of $88.8 \pm 0.3\%$. RG values ranged from $80.7 \pm 0.7\%$ to $94.9 \pm 0.7\%$, with an average of $87.7 \pm 0.7\%$. The highest results were observed in the Swedish (RA-SWE) and Latvian (RA-LVA) samples.

The sea buckthorn oil group exhibited slightly lower radical scavenging activity compared to the olive, hemp, milk thistle, and rapeseed oil groups. The average RSA by UV/VIS analysis was $83.9 \pm 0.3\%$, while the RG-based analysis yielded an average of $83.6 \pm 0.7\%$. The Latvian sample (SE-LVA) recorded the highest value within the sea buckthorn oil group (UV/VIS: $93.5 \pm 0.3\%$; RG: $93.2 \pm 0.7\%$).

The sunflower and linseed oil groups showed greater intra-group variability. In the sunflower oil group, UV/VIS values ranged from $74.3 \pm 0.2\%$ to $85.0 \pm 0.3\%$, with a mean of $79.3 \pm 0.2\%$, whereas RG values ranged more widely, from $73.8 \pm 0.6\%$ to $85.8 \pm 0.6\%$, averaging $79.4 \pm 0.6\%$. For linseed oils, the mean values were $67.7 \pm 0.2\%$ (UV/VIS) and $67.8 \pm 0.6\%$ (RG), respectively.

The lowest overall radical scavenging activity was recorded in the rice bran, corn, and grape oil groups. Rice bran oil samples exhibited UV/VIS RSA ranging

from 67.6% to 77.0%, with a mean of $73.2 \pm 0.2\%$; the RG-based mean was $73.0 \pm 0.6\%$. Even lower values were observed in the corn oil group: UV/VIS ranged from $61.5 \pm 0.2\%$ to $77.3 \pm 0.2\%$ (mean: $69.7 \pm 0.2\%$), and RG from $61.3 \pm 0.6\%$ to $76.7 \pm 0.6\%$ (mean: $69.3 \pm 0.6\%$). The grape oil group showed pronounced value dispersion: UV/VIS ranged from $59.1 \pm 0.2\%$ to $88.7 \pm 0.3\%$, and RG from $56.7 \pm 0.6\%$ to $83.7 \pm 0.6\%$, with means of $71.8 \pm 0.2\%$ (UV/VIS) and $69.7 \pm 0.6\%$ (RG). The lowest values were found in the French (GR–FRA) and German (GR–DEU) samples, potentially due to differences in extraction methods, raw material treatment, or environmental/agrochemical conditions.

Comparing UV/VIS spectrophotometry with smartphone-based image analysis indicates that RG colour system data from smartphone images strongly correlate with the UV/VIS method. The t-value of 0.47 ($p > 0.05$) suggests no significant difference between the measurement methods.

Summary data indicate that the relative standard deviation (RSD) for RSA determination using the smartphone image analysis (VAA) method averaged 0.8%, which is 0.5 percentage points higher than that observed with traditional UV/VIS spectrophotometry (0.3%). This difference reflects the influence of colour on the analytical process inherent to the method. For total phenolic content (TPC) determination under identical conditions, same distance, white background, lighting, and smartphone settings, the RSD for VAA was 0.7%, which is 0.1% lower.

Repeatability, calculated according to ISO 5725-2 using the formula $r = 2.8 \times \text{RSD}$, was 2.3% for the VAA method, compared to 0.8% for UV/VIS. These values fall within the 95% confidence interval for pairwise measurement differences. While the repeatability range is wider for VAA, it remains within the acceptable validation limit for analytical chemistry methods ($\leq 5\%$). The increase from a UV/VIS mean of 0.8% (maximum 1.0%) to a VAA mean of 2.3% (maximum 3.0%) reflects variability in image acquisition and algorithmic processing; however, it does not compromise the method's suitability for quantitative analysis.

The assessment of accuracy revealed that the VAA method's mean absolute deviation was 0.7% (maximum 4.4%) compared to UV/VIS, indicating minimal systematic error and compliance with the acceptable $\pm 5\%$ limit.

The obtained results confirm that, under standardised image acquisition conditions and with appropriate image processing applications, the smartphone-based VAA method can provide adequate accuracy ($\text{RSD} < 1\%$), repeatability ($r < 2.3\%$), and precision ($< 4.5\%$). Thus, this method can be considered a suitable alternative for determining radical scavenging activity in place of conventional UV/VIS spectrophotometry.

6. Determination of total phenolic content

To determine the total phenolic content, calibration curves were constructed using both spectrophotometric and smartphone image analysis methods. The curves were generated based on gallic acid calibration solutions of known concentrations (Fig. 9).

In each sample, RGB channel intensities were recorded and plotted against the corresponding concentration to generate linear regression curves for each colour channel individually. The resulting coefficients of determination were as follows: $R^2 = 0.9934$ for the red channel, $R^2 = 0.9938$ for the green channel, and $R^2 = 0.9752$ for the blue channel. These values indicate a high degree of linearity between the recorded colour intensity and phenolic concentration, thereby confirming that image analysis is suitable for quantitative measurements. For comparison, the coefficient of determination for the UV/VIS spectrophotometric analysis was $R^2 = 0.9997$ (Fig. 9).

To evaluate the method for determining total phenolic content, the following statistical analyses were performed: regression analysis, t-test, coefficient of determination (R^2), F-test, relative standard deviation (%RSD), matrix effect, equivalence test (TOST), limit of detection (LOD), and limit of quantification (LOQ).

The red channel (R) values from smartphone-captured images were used to calculate the absorbance values corresponding to gallic acid concentrations. Assessing the linearity of the gallic acid calibration across the ranges of 1 to 200 mg L⁻¹ and 1 to 160 mg L⁻¹ yielded the following equations: $y = 0.0056x + 0.006$ ($R^2 = 0.9935$) for 1–200 mg L⁻¹ and $y = 0.0061x - 0.002$ ($R^2 = 0.9988$) for 1–160 mg L⁻¹.

It was found that better linearity was achieved using nine calibration points within the range of 1 to 160 mg GAE L⁻¹. The F-test result was significantly lower for the 1–160 mg L⁻¹ range (5.28×10^{-13}) compared to the 1–200 mg L⁻¹ range (3.74×10^{-11}), indicating a substantial difference in the quality of fit between the two ranges. Thus, the calibration curve in the 1–160 mg L⁻¹ range proved to be more suitable.

Given the statistical significance of the F-test and the observed linearity, it was concluded that using a nine-point calibration with gallic acid concentrations from 1 to 160 mg L⁻¹ yields more precise results. Based on this, the limits of detection (LOD) and quantification (LOQ) were calculated.

The method's limit of detection (LOD) was determined to be 1.254 mg L⁻¹, and the limit of quantification (LOQ) was 3.801 mg L⁻¹. Therefore, the measurement range for gallic acid using the developed method spans from 3.801 to 160 mg L⁻¹. Additionally, it was observed that the matrix effect of the analysed vegetable oils did not exceed $\pm 5\%$, indicating the method's suitability for diverse sample compositions and minimal matrix interference in the quantitative determination of total phenolic content. Reported values in the literature support

these findings, with LOD values ranging from 1.20 to 2.20 mg GAE L⁻¹ and LOQ values from 3.60 to 6.60 mg GAE L⁻¹ in studies involving coffee products (Anh-Dao et al., 2023). The authors recommend the use of the blue (B) channel for plant extracts rich in phenolic compounds and the red (R) channel for those with lower phenolic content.

To quantitatively compare the accuracy of smartphone image analysis with UV/VIS spectrophotometry, a t-test was performed, which showed a calculated t-value of 4.63 ($p < 0.05$), exceeding the critical value and indicating statistically significant differences between the two methods. However, when performing an equivalence test (TOST) using a practical margin of ± 5 mg GAE kg⁻¹, the obtained 95% confidence interval (0.27 to 0.69 mg GAE kg⁻¹) fell entirely within the acceptable range, demonstrating that the smartphone image analysis method provides sufficient accuracy for determining phenolic concentrations.

In total, 40 vegetable oil samples were analysed, divided into ten groups according to oil type. Each group included four samples of different geographical origin, allowing assessment of phenolic content across both oil types and regions of origin.

The highest total phenolic content was observed in Portuguese olive oil (OL–PRT) and Latvian hemp oil (HE–LVA). In spectrophotometric analysis, these samples recorded values of 400.1 ± 1.6 and 181.4 ± 0.7 mg GAE kg⁻¹ of oil, respectively. Corresponding smartphone image analysis values were 400.0 ± 2.5 and 184.5 ± 1.1 mg GAE kg⁻¹ of oil, demonstrating consistency between the two methods.

In contrast, the lowest total phenolic content was found in grape and corn oils, with spectrophotometric values ranging from 10.8 ± 0.1 mg GAE kg⁻¹ in French grape oil (GR–FRA) to 13.2 ± 0.1 mg GAE kg⁻¹ in Italian corn oil (CO–ITA). The smartphone image analysis values ranged from 10.4 ± 0.1 mg GAE kg⁻¹ (GR–FRA) to 12.9 ± 0.1 mg GAE kg⁻¹ (CO–ITA).

Analysis of sample groups revealed that the highest phenolic content was found in the olive oil group, where the Portuguese (OL–PRT) and Greek (OL–GRC) samples showed significantly higher values compared to Italian (OL–ITA) and Spanish (OL–ESP) olive oils. This suggests potential influences from cultivation conditions or processing methods. A similar was observed in the hemp oil group, where Latvian (HE–LVA) and Lithuanian (HE–LTU) samples demonstrated higher phenolic concentrations than those from Poland (HE–POL) and Germany (HE–DEU), likely reflecting differences in climate and soil conditions.

In contrast, the rapeseed oil group exhibited markedly lower values than the olive oil group, which is expected given the differing chemical composition of rapeseed oil. The highest values in this group were recorded in Swedish (RA–SWE) and Latvian (RA–LVA) samples (101.4 ± 0.4 and 89.5 ± 0.3 mg GAE kg⁻¹), while the lowest were found in German (RA–DEU) and Polish (RA–POL) samples (80.7 ± 0.3 and 85.9 ± 0.3 mg GAE kg⁻¹). These small

variations may be attributed to differences in rapeseed varieties and regional cultivation practices.

The lowest phenolic contents were observed in the grape and corn oil groups. Within the grape oil group, the highest content was found in the Spanish (GR–ESP) (15.3 ± 0.1 mg GAE kg⁻¹), and the lowest in the French (GR–FRA) sample (10.8 ± 0.1 mg GAE kg⁻¹). These low values suggest that grape oils generally contain limited amounts of phenolic compounds, possibly due to the extraction methods and raw material treatment. Similarly, the corn oil group showed the lowest phenolic concentrations across the study, suggesting that this oil type is chemically distinct and contains relatively low phenolic content.

Despite some differences between methods, smartphone image analysis enables reliable phenolic content determination, as supported by the statistically significant correlation between methods and the small relative error, indicating that it can be used as an alternative to UV/VIS spectrophotometry.

Comparison of UV/VIS spectrophotometry and smartphone image analysis showed that the relative standard deviation (%RSD) for total phenolic content (TPC) determination was 0.5% and 0.7%, respectively. This demonstrates that both methods offer high precision and repeatability. It is worth noting that the %RSD reported for spectrophotometry in the literature ranges from 0.1% to 4.8% (Yanti et al., 2017; Jakubíková et al., 2022; Anh-Dao et al., 2023; Zugazua-Ganado et al., 2024).

While the lower measurement variability of UV/VIS spectrophotometry can yield more precise results, smartphone image analysis measurements are still viable as an alternative. Notably, scientific literature has not yet reported data on the use of smartphone image analysis for determining total phenolic content in vegetable oils.

Compared to values reported in the literature, the smartphone image analysis (VAA) method developed in this study showed substantially lower %RSD values, indicating analytical precision and consistency across repeated measurements.

In accordance with ISO 5725-2, repeatability was assessed by calculating the repeatability limit ($r = 2.8 \times \text{RSD}$) to evaluate measurement consistency. This limit defines the maximum allowable difference between two independent measurements at a 95% confidence level. UV/VIS showed a mean repeatability of 1.3% (maximum 2.6%), while the VAA method yielded a mean of 1.9% (maximum 3.3%). This means that two consecutive VAA measurements differ, on average, by $\pm 1.9\%$ (compared to $\pm 1.3\%$ for UV/VIS), with maximum variation up to $\pm 3.3\%$. Both mean and maximum repeatability values meet the commonly accepted analytical criteria ($r \leq 5\%$), confirming the reliability of VAA results.

Precision was further evaluated by calculating the absolute percentage difference between VAA and UV/VIS results. The average deviation was found to be 1.5%, with no single measurement exceeding 3.7%. These values are within the generally accepted $\pm 5\%$ limit for quantitative analyses, demonstrating that

the VAA method closely replicates UV/VIS results with minimal systematic error.

These findings confirm the reliability of the VAA method for accurate determination of total phenolic content in vegetable oils, supporting its application as a viable alternative to conventional UV/VIS spectrophotometry.

7. Correlation Matrix Analysis Based on the Analytical Results

Correlation matrix analysis provides a detailed quantitative insight into the interrelationships among physicochemical parameters within the composition of various vegetable oils, using a colour intensity heatmap. The correlation intensity heatmap (Fig. 10) includes and compares the following indicators from previous analyses: colour number (CN), total phenolic content (TPC), radical scavenging activity (RSA), and hue value (H), which reflects the fluorescence colour of the oil.

A statistically significant correlation was found between the colour number (CN) and total phenolic content (TPC) ($r=0.88$, $p<0.05$), indicating that phenolic compounds strongly influence the oil's colour. A significant correlation also exists between CN and radical scavenging activity (RSA) ($r=0.72$, $p<0.05$), suggesting a link between pigments and antioxidant properties. Additionally, the correlation between CN and hue value (H) was significant ($r=0.61$, $p<0.05$), highlighting differences between the visible light spectrum and the fluorescence spectrum.

A statistically significant correlation was also observed between RSA and TPC ($r=0.72$, $p<0.05$), confirming the influence of phenolic compounds on antioxidant properties. In contrast, the correlation between RSA and hue value (H) was weak ($r=0.15$, $p>0.05$), indicating a negligible relationship between antioxidant and fluorescent properties.

8. Development of an algorithm in the Python programming language

The developed algorithm allows data from images obtained on a smartphone in the RGB colour system to be converted into absorbance, generate calibration curves for determining total phenolic content, and calculate the total phenolic content concentration and radical scavenging activity of the analysed vegetable oil samples. This open-source program can be used with a Python development environment installed on a computer (e.g., IDLE Python 3.11) or through online programming tools like Kaggle (<https://www.kaggle.com>). The advantage of the

Kaggle environment is that it does not require Python software to be installed on Windows, iOS, Linux, or other operating systems.

Compared to MS Excel, the Python programming language offers several advantages, as it enables more complex calculations, provides a wide range of specialized libraries designed for scientific data, complex algorithms, calculations, and analyses (e.g., NumPy, SciPy, Pandas), supports larger data volumes, offers higher reproducibility, allowing for the automation of calculation processes, and can be integrated into other programming environments such as C++, Java, HTML, or Android and iOS applications.

Although there are other equivalent programming languages, such as R and RStudio, which are also used for data analysis, statistics, and can be integrated with other programming languages, Python's advantages lie in its flexibility, extensive library offerings, and broader application in scientific fields related to large datasets, complex algorithms, as well as its strong support in machine learning and artificial intelligence.

8.1. Python algorithm for smartphone image analysis to determine the total phenolic content in vegetable oils

If the user does not have the ability to run the Python algorithm code in a Python development environment (IDLE Python 3.11), there is the option to place this code in the online programming tool Kaggle (<https://www.kaggle.com>). In the smartphone image analysis using the RGB colour system for determining total phenolic content in vegetable oils, the following stages were used in the structure of the Python code algorithm: 1) necessary libraries; 2) user data input and processing; 3) absorbance calculations; 4) linear regression and calibration curve plotting; 5) analysis of the vegetable oil sample data related to total phenolic content determination; and 6) saving the obtained results as an MS Excel file. The online resource for downloading the full Python algorithm code is provided in the description of Stage V of the study.

To determine the total phenolic content in vegetable oils using a Python algorithm, the necessary libraries are imported, including NumPy, Pandas, Matplotlib, and SciPy. The user inputs the required data, such as concentration units, I_0 value, and the number of calibration points. Absorbance calculations are performed for each colour channel (R, G, B) and combined channels (RGB, RG, RB, GB). Linear regression analysis is used to calculate the calibration curves, which are then plotted graphically. The results are analysed and saved in MS Excel format. The algorithm is designed so that the user can input data, which are then converted into NumPy arrays for more efficient data processing.

The developed Python code algorithm can be used not only for determining the total phenolic content in vegetable oils using smartphone image analysis, but

also for the analysis of other plants or chemical substances that use light-sensitive sensors capable of detecting the RGB colour system.

8.2. Python algorithm for smartphone image analysis to determine radical scavenging activity in vegetable oils

In the smartphone image analysis using the RGB colour system for determining radical scavenging activity in vegetable oils, the following structural stages of the Python code algorithm were applied: 1) required modules and libraries; 2) user data input and processing; 3) absorbance calculations; 4) analysis of the vegetable oil sample data related to radical scavenging activity determination; and 5) saving the obtained results as an MS Excel file. The online resource for downloading the full Python algorithm code is provided in the description of Stage V of the study.

To determine the radical scavenging activity in vegetable oils using a Python algorithm, the math module and Pandas library are imported. The user inputs the I_0 and IDPPH values, as well as the number of samples to be analysed. Absorbance values are calculated for each colour channel (R, G), and the necessary mathematical calculations are performed. The obtained results are displayed to the user and saved in MS Excel format. The algorithm provides a structured approach to data input and processing, ensuring accurate and easily interpretable results. The developed algorithms open new possibilities for innovative scientific research and chemical analysis.

9. Evaluation of the functional capabilities of the *DiColorimetry* smartphone application

To extend the applicability of the algorithm developed in the Python programming language and ensure its accessibility on smartphone devices, the *DiColorimetry* application was developed (Fig. 11A). Its aim is to provide users with an intuitive and functionally comprehensive environment for the quantitative determination of total phenolic content and radical scavenging activity using smartphone image data in the RGB colour system.

The application was developed using the Flutter framework, which is based on the Dart programming language. This choice provides a modern and visually consistent graphical user interface across multiple platforms. The system architecture integrates the Flutter-built user interface with the embedded Python algorithm, which functions as an analytical module. This module performs data processing and quantitative analysis directly on the smartphone, without the need for external data processing platforms.

The application comprises three main analytical modes: *Total Phenolic Content*, *Radical Scavenging Activity*, and *Colorimetric Camera* (Fig. 11B). Each mode includes three logically sequential stages: data preparation, sample analysis, and result visualisation. Calibration data can be entered manually or extracted from images of calibration samples, from which RGB values are automatically obtained. These values are then converted to absorbance and concentration using a linear regression model. The resulting data are displayed in tabular form and can be exported in CSV format for further analysis.

The Colorimetric Camera mode offers extended functionality by enabling the analysis of image colour data in both RGB and HSV colour systems. Users can select the region of interest directly from the image, choosing between circular or square shapes. Unlike the TPC and RSA modes, which are limited to RGB data processing, this mode is suitable for a broader range of applications, including the development of experimental methodologies and chemical analyses in various sample matrices.

The *DiColorimetry* application ensures high accessibility and accurate data processing within the smartphone environment, while also offering options for data export and subsequent analysis for scientific research purposes. This opens new opportunities for the development of novel analytical chemistry methods.

CONCLUSIONS

1. Analysis of peroxide, acid, and iodine values revealed that the selected vegetable oils correspond to the quality indicators of fresh oils, rendering them suitable for colorimetric studies.
2. Evaluation of the optimal distance for image acquisition in the RGB colour system determined that a distance of 12.0 ± 0.1 cm is most appropriate. Increasing this distance reduces the precision of boundary detection concerning the cuvette area, while decreasing it impairs the camera's focusing capability.
3. The entire RGB colour system was used for colorimetric colour number determination, as vegetable oil can exhibit not only its characteristic yellow colour but also green and red hues. Therefore, it is not sufficient to consider only the primary and secondary colour wheel.
4. Using fluorescent light, the studied vegetable oils were categorised into six hierarchical clusters based on values obtained from their Hue: red, blue, cyan, green, and yellow.
5. Determination of radical scavenging activity using the RG (red–green) values of the RGB colour system yielded results comparable to those obtained with the UV/VIS spectrophotometric method, with statistically insignificant differences. This demonstrates the potential of this method as a viable alternative to classical analytical techniques.

6. Assessment of radical scavenging activity indicated a mean repeatability of 2.3% and a maximum of 3.0%, with a mean precision of 0.7% and a maximum of 4.4%. The resulting relative standard deviation (%RSD) of 0.8% closely aligns with the lowest values reported in the literature for spectrophotometric methods, confirming the method's suitability and reliability across various vegetable oil samples.
7. In the analysis of total phenolic content using a gallic acid calibration curve, the coefficients of determination obtained were $R^2 = 0.9988$ for red (R), $R^2 = 0.9938$ for green (G), and $R^2 = 0.9752$ for blue (B) colours. The red (R) and green (G) colour systems demonstrated coefficients of determination similar to that of UV/VIS spectrophotometry ($R^2 = 0.9977$).
8. Evaluation of the total phenolic content method revealed high precision, repeatability, and reliability, with a determination coefficient (R^2) of 0.9988 for the red colour. The limits of detection (LOD) and quantification (LOQ) were determined to be 1.25 mg L^{-1} and 3.80 mg L^{-1} , respectively, confirming the method's suitability and comparability to classical UV/VIS spectrophotometry.
9. Assessment of total phenolic content indicated a mean repeatability of 1.9 and a maximum of $3.3 \text{ mg GAE kg}^{-1}$ oil, with a mean precision of 1.5 and a maximum of $3.7 \text{ mg GAE kg}^{-1}$ oil. The resulting relative standard deviation (%RSD) of 0.7% closely aligns with the lowest values reported in the literature for spectrophotometric methods, confirming the method's suitability and reliability across various vegetable oil samples.
10. Algorithms for determining total phenolic content and radical scavenging activity have been developed in the Python programming language and integrated into the smartphone application DiColorimetry.
11. The results obtained in this PhD study confirm the proposed hypothesis that smartphone image analysis and the integration of colourimetric methods constitute a sustainable alternative to classical optical analytical chemistry techniques for the evaluation of vegetable oils.

Mg.chem. Sanita Vucāne
e-pasts / *e-mail*: sanita.vucane@lbtu.lv
Latvijas Biozinātņu un tehnoloģiju universitāte /
Latvia University of Life Sciences and Technologies
Lauksaimniecības un pārtikas tehnoloģijas fakultāte, Pārtikas institūts /
Faculty of Agriculture and Food Technology, Food Institute