

UDK: 664.8:577.15:663.8

**MEVA-SABZAVOT XOMASHYOSIDAN BIOLOGIK FAOL
MODDALARNI FERMENTATIV EKSTRAKSIYALASH
JARAYONINING TEXNOLOGIK PARAMETRLARINI
OPTIMALLASHTIRISH**

Buxoro davlat universiteti professori Zaripov Gulmurot Toxirovich

Tadqiqodchi Samadova Nigina Shaxobiddinovna

ANNOTATSIYA

Maqolada meva-sabzavot xomashyosidan biologik faol moddalarni fermentativ ekstraksiyalash jarayonini Response Surface Methodology asosida optimallashtirish metodikasi ishlab chiqilgan. Ferment konsentratsiyasi, harorat, pH, gidroliz vaqti va qattiq/suyuq nisbat asosiy omillar sifatida qabul qilinib, Box–Behnken dizayni, ikkinchi darajali polinom, ANOVA va desirability funksiyasi qoʻllanishi asoslangan. TPC, TFC, antioksidant faollik va ekstraksiya chiqimi javob funksiyalari sifatida taklif etilgan. Model adekvatligini lack-of-fit, adjusted va predicted R^2 hamda tasdiqlash tajribalari bilan baholash tartibi berilgan.

Kalit soʻzlar: fermentativ ekstraksiya; optimallashtirish; Response Surface Methodology; Box–Behnken; biologik faol moddalar; polifenollar; texnologik parametrlar

ANNOTATSIYA (russskiy yazyk)

V statye razrabotan metodicheskiy podxod k optimizatsii fermentativnoy ekstraktsii biologicheskii aktivnykh veshchestv iz plodovo-ovoshnogo сыра методом Response Surface Methodology. V качестве факторов предложены концентрация фермента, температура, pH, продолжительность гидролиза и соотношения твердой и жидкой фаз. Обосновано применение плана Box–Behnken, квадратичной регрессионной модели, ANOVA и функции desirability.

В качестве откликов рассматриваются общее содержание фенолов, флавоноидов, антиоксидантная активность и выход экстракта. Описана процедура валидации оптимума независимыми опытами.

ABSTRACT

A Response Surface Methodology framework for optimizing enzyme-assisted extraction of bioactive compounds from fruit and vegetable matrices is presented. Enzyme concentration, temperature, pH, hydrolysis time and solid-to-liquid ratio are treated as the key process variables. A Box–Behnken design, quadratic polynomial regression, ANOVA and desirability-based multiresponse optimization are proposed. Total phenolics, total flavonoids, antioxidant activity and extraction yield are used as responses. Model adequacy is assessed through lack-of-fit, adjusted and predicted R-squared values and independent validation experiments.

Keywords: enzyme-assisted extraction; optimization; Response Surface Methodology; Box–Behnken; bioactive compounds; polyphenols; process parameters

1. KIRISH

Ferment yordamida ekstraksiyalashda yuqori natijaga erishish faqat ferment tanlash bilan cheklanmaydi. Ferment konsentratsiyasi, muhit pH-i, harorat, gidroliz davomiyligi va qattiq faza–ekstragent nisbati bir vaqtning o‘zida ferment kinetikasiga, substratning shishishiga, diffuziya tezligiga va maqsadli komponentlarning barqarorligiga ta’sir qiladi. Shu sababli bir omilli tajribalar ko‘p vaqt talab qilishi va omillar o‘rtasidagi o‘zaro ta’sirni ko‘rsatmasligi mumkin. Response Surface Methodology (RSM) va eksperimentni rejalashtirish usullari fermentativ ekstraksiyani ko‘p omilli optimallashtirishda samarali vosita hisoblanadi [1–7,17].

RSM ning asosiy afzalligi — nisbatan kam tajriba soni bilan omillarning chiziqli, kvadratik va o‘zaro ta’sir effektlarini baholash, matematik model

qurish va maqsadli javob funksiyasi uchun optimumni prognoz qilish imkoniyatidir. Oziq-ovqat va fitokomponentlar ekstraksiyasida Box–Behnken Design, Central Composite Design va D-optimal design ko‘p qo‘llanadi. 2024 yilgi uzum siqilmasi tadqiqotida ferment konsentratsiyasi, ekstraksiya vaqti va qattiq/suyuq nisbati CCD/RSM orqali optimallashtirilgan [1]. 2025 yilgi Pisco uzum siqilmasida D-optimal dizayn orqali tannaza va syellyulaza yordamida fenollar va antioksidant faollik maksimallashtirilgan [4].

Fermentativ jarayonlarda pH va harorat ayniqsa muhim. pH fermentning aktiv markazi ionlanish holati va substrat bilan bog‘lanishini belgilasa, harorat reaksiya tezligi bilan birga ferment denaturatsiyasi xavfini ham boshqaradi. Vaqt ortiqcha uzaytirilganda dastlab biofaol moddalar chiqishi ortishi, keyin esa plato yoki pasayish kuzatilishi mumkin. Gidromodulning oshishi konsentrasyon gradiyentni yaxshilaydi, ammo katta miqdorda ekstragent sarfi keyingi konsentrlash bosqichini qimmatlashtiradi. Shu bois texnologik optimum maksimal chiqim bilan birga resurs sarfini ham hisobga olishi lozim.

Tadqiqotning maqsadi meva-sabzavot xomashyosidan biologik faol moddalarni fermentativ ekstraksiyalash jarayonida ferment konsentratsiyasi, harorat, pH, vaqt va xomashyo–ekstragent nisbatining ta’sirini RSM asosida modellashtirish, asosiy va o‘zaro ta’sir effektlarini aniqlash hamda ko‘p mezonli optimal rejimni ilmiy asoslashdan iborat.

2. MATERIALLAR VA USULLAR

Optimallashtirish uchun dastlabki skrining natijalariga ko‘ra eng samarali ferment yoki ferment kompozitsiyasi tanlanadi. Model ob’jekt sifatida bir xil partiyadagi uzum siqilmasi, anor po‘stlog‘i yoki olma siqilmasidan foydalanish mumkin. Xomashyo 40–45 °C da quritiladi, 0,5–1,0 mm gacha maydalanadi va namlik miqdori aniqlanadi. Barcha natijalar quruq moddaga qayta hisoblanadi.

Beshta mustaqil omilni bir vaqtda o‘rganish uchun besh faktorli Box–Behnken dizayn qo‘llash mumkin: X1 — ferment konsentratsiyasi, X2 — harorat, X3 — pH, X4 — gidroliz vaqti, X5 — qattiq/suyuq nisbat. Uch darajali



kodlashda -1 , 0 va $+1$ qiymatlari qo'llanadi. Aniq diapazon ferment spesifikatsiyasi va skrining tajribalari asosida belgilanadi; maqolada quyidagi amaliy diapazonlar namunaviy tarzda taklif etiladi.

Javob funksiyalari sifatida Y1 — umumiy fenol moddalar miqdori (mg GAE/g), Y2 — umumiy flavonoidlar (mg QE/g), Y3 — DPPH radikalini so'ndirish faolligi yoki Trolox ekvivalenti, Y4 — ekstraksiya chiqimi (%) va zaruratga ko'ra Y5 — HPLC bo'yicha maqsadli fenol komponenti tanlanadi. Bu javoblarning barchasini bir vaqtda maksimallashtirish uchun desirability function yondashuvidan foydalanish mumkin.

RSM modeli ikkinchi darajali polinom bilan ifodalanadi: $Y = \beta_0 + \sum \beta_i X_i + \sum \beta_{ii} X_i^2 + \sum \beta_{ij} X_i X_j$, bu yerda Y — prognoz qilinayotgan javob; β_0 — erkin had; β_i — chiziqli koeffitsiyent; β_{ii} — kvadratik koeffitsiyent; β_{ij} — omillar o'zaro ta'siri koeffitsiyenti; X_i va X_j — kodlangan omillar. Model dispersion tahlil (ANOVA) bilan baholanadi. Model $p < 0,05$, lack-of-fit $p > 0,05$ bo'lishi, R^2 , adjusted R^2 va predicted R^2 qiymatlari o'zaro yaqin bo'lishi maqbul.

Optimumni tasdiqlash uchun model tavsiya qilgan sharoitda kamida uchta mustaqil tajriba o'tkaziladi. Prognoz va eksperiment qiymatlari o'rtasidagi nisbiy xato $|Y_{exp} - Y_{pred}| / Y_{pred} \times 100$ formulasi bilan hisoblanadi. Agar farq 5% atrofida yoki undan kam bo'lsa va statistik jihatdan ahamiyatli bo'lmasa, model texnologik prognoz uchun yetarlicha adekvat deb qabul qilinishi mumkin.

Ko'p mezonli optimallashtirishda faqat maksimal TPC ni emas, balki ferment sarfi va ekstragent hajmini ham cheklov sifatida kiritish maqsadga muvofiq. Masalan, TPC, TFC va antioksidant faollik «maximize», ferment dozaci va qattiq/suyuq nisbatdagi ekstragent sarfi esa «minimize» maqsadida belgilanadi. Bu yondashuv laboratoriya optimumini sanoatga ko'chirish imkonini oshiradi.

Omil	Belgi	-1 daraja	0 daraja	+1 daraja
------	-------	-----------	----------	-----------

Ferment konsentratsiyasi, %	X1	0,5	1,0	1,5
Harorat, °C	X2	35	45	55
pH	X3	3,5	4,5	5,5
Gidroliz vaqti, min	X4	30	105	180
Qattiq/suyuq nisbat	X5	1:10	1:20	1:30

Javob funksiyasi	Birlik	Optimallashtirish maqsadi
Y1 – umumiy fenollar	mg GAE/g quruq massa	Maksimallashtirish
Y2 – umumiy flavonoidlar	mg QE/g quruq massa	Maksimallashtirish
Y3 – antioksidant faollik	μmol TE/g yoki %	Maksimallashtirish
Y4 – ekstraksiya chiqimi	%	Maksimallashtirish
Qo‘shimcha cheklov	ferment/erituvchi sarfi	Minimallashtirish

3. NATIJALAR VA ULARNING MUHOKAMASI

Muhim izoh: dissertatsiya bo'yicha birlamchi eksperimental ma'lumotlar taqdim etilmagani sababli, ushbu qo'lyozmada soxta natijalar keltirilmaydi. Natijalar bo'limida adabiyotlarda tasdiqlangan qonuniyatlar, tadqiqot natijalarini qanday statistik va texnologik talqin qilish kerakligi hamda muallifning real ma'lumotlarini joylashtirish uchun tayyor jadval tuzilmalari berilgan. Nashrga yuborishdan oldin jadvallardagi «kiritiladi» maydonlari haqiqiy tajriba natijalari bilan to'ldirilishi shart.

RSM tahlilida birinchi vazifa — har bir omilning yo‘nalishini to‘g‘ri talqin qilish. Ferment konsentratsiyasi past diapazonda ko‘tarilganda substratning gidroliz darajasi va ekstraksiya chiqimi oshishi kutilgan qonuniyat. Ammo ma’lum chegaradan keyin aktiv markazlar soni substrat miqdoriga nisbatan ortiqcha bo‘lib, javob funksiyasi platoga chiqishi mumkin. Kvadratik X_1^2 hadining manfiy va statistik ahamiyatli bo‘lishi optimum mavjudligini ko‘rsatadi.

Harorat ta’siri ham odatda parabolik xarakterga ega. Past haroratda ferment-substrat to‘qnashuvlari sekin, yuqori haroratda esa reaksiya tezligi ortishi bilan birga ferment denaturatsiyasi va ayrim fenollarning oksidlanishi/degradatsiyasi xavfi kuchayadi. 2026 yilda qizil ajdar mevasi sharbatida pektinaza ishtirokida Box–Behnken optimallashtirish 0,3% ferment, 45 °C va 120 minut atrofida yuqori chiqim va bioaktiv ko‘rsatkichlarni ta’minlagan [7]. Baklajan po‘stlog‘ida esa boshqa matrisa va ferment sharoiti sabab optimum taxminan 37 °C atrofida topilgan [2]. Bu farq matrisaga xos optimallashtirish zarurligini ko‘rsatadi.

pH ning ta’siri fermentning tabiati bilan bevosita bog‘liq. Pektinaza va ko‘pchilik zamburug‘ manbali syellyulazalar ko‘pincha kislotali muhitda faol. Agar X_3 va X_1X_3 koeffitsiyentlari ahamiyatli chiqsa, ferment dozasining samarasi pH ga bog‘liq ekani aniqlanadi. Bu holat 3D response surface grafiklarida «qiya» yoki elliptik konturlar bilan namoyon bo‘ladi. Doiraviy konturlar esa o‘zaro ta’sirning kuchsizligini ko‘rsatadi.

Gidroliz vaqti bo‘yicha javob dastlab tez o‘sib, keyin sekinlashishi mumkin. Bioaktiv moddalarning asosiy qismi birinchi 60–120 minutda ajralishi, keyingi vaqtda o‘sishning kamayishi texnologik nuqtai nazardan muhim: uzoq vaqt bir necha foiz qo‘shimcha chiqim bersa-da, energiya, ishlab chiqarish sikli va mikrobiologik xavfni oshiradi. Shu sababli desirability optimumi absolyut maksimumdan biroz past, ammo iqtisodiy samarali vaqtni tanlashi mumkin.

Qattiq/suyuq nisbat ko'paygan sari massa almashinuvi uchun harakatlantiruvchi kuch yaxshilanadi, lekin 1:30 yoki undan yuqori gidromodul sanoatda konsentrlash xarajatini ko'paytiradi. Shuning uchun maqola muhokamasida laboratoriyadagi maksimal ekstraksiya bilan sanoatdagi «qabul qilinadigan optimum»ni farqlash muhim. Masalan, TPC 1:30 da atigi 3–5% yuqori bo'lsa, 1:20 nisbat texnologik jihatdan maqbulroq bo'lishi mumkin.

2024 yilgi uzum siqilmasi ishida ferment konsentratsiyasi, vaqt va qattiq/suyuq nisbat uchun CCD/RSM qo'llanib, har bir ferment uchun alohida optimum aniqlangan [1]. Bu ishning metodologik ahamiyati shundaki, pektinaza, syellyulaza va gemisellyulaza uchun optimal parametrlar bir xil emas. Shuning uchun mazkur PhD tadqiqotida ham bir fermentdan ikkinchisiga optimumni mexanik ko'chirish emas, balki alohida matematik modellashirish yoki kamida tanlangan kompleks uchun yangi RSM qurish zarur.

Modelning sifatini baholashda faqat yuqori R^2 ga tayanish yetarli emas. Adjusted R^2 ortiqcha terminlar hisobidan sun'iy oshmaydi va predicted R^2 yangi nuqtalar uchun prognoz qobiliyatini ko'rsatadi. Adequate precision 4 dan yuqori bo'lishi, qoldiqlar normal taqsimlanishi va predicted vs actual grafigida nuqtalar diagonalga yaqin joylashishi maqbul. Qoldiqlar vaqt yoki tajriba tartibi bo'yicha tendensiya ko'rsatsa, bu nazorat qilinmagan omillar yoki sistematik xatoni anglatishi mumkin.

Optimal rejimni maqolada tekshirish tajribasi bilan yakunlash zarur. Masalan, model Y1, Y2 va Y3 uchun muayyan qiymatlarni prognoz qilsa, tasdiqlash seriyasida olingan qiymatlar ishonch oralig'iga tushishi kerak. Shu bilan birga, optimumdagi ekstraktning HPLC profili nazorat va an'anaviy ekstraksiya bilan qiyoslansa, matematik optimallashtirish faqat umumiy ko'rsatkichni emas, maqsadli komponentlar chiqishini ham yaxshilagani isbotlanadi.

RSM natijalarini sanoatga moslashtirish uchun ikkinchi bosqichda 0,5–5,0 L laboratoriya reaktorida masshtablash tavsiya etiladi. Masshtab oshganda

aralashtirish gidrodinamikasi, issiqlik o'tkazish va fermentning substrat bilan kontakt sharoiti o'zgaradi. Shu bois kolbadagi optimum pilot hajmda tekshirilishi, ayniqsa qovushqoq xomashyolarda rpm o'rniga quvvat sarfi/hajm yoki aralashtirish intensivligi kabi masshtablash mezonlari qo'llanishi maqbul.

Eksperiment rejasini tuzishdan oldin omil diapazonlarining real texnologik chegaralari belgilanishi kerak. Juda keng diapazon kvadratik model uchun nomutanosiblik va kuchli lack-of-fit keltirib chiqarishi, juda tor diapazon esa haqiqiy optimumni qamrab olmasligi mumkin. Shuning uchun skringing tajribalarida har bir omil bo'yicha javob funksiyasida sezilarli, ammo qaytarilmas degradatsiyasiz o'zgarish kuzatiladigan interval tanlanadi. Bu bosqich RSM modelining keyingi ishonchliligiga to'g'ridan-to'g'ri ta'sir qiladi.

Regressiya tenglamasida statistik ahamiyatsiz hadlarni mexanik ravishda olib tashlash ham ehtiyotkorlikni talab qiladi. Agar iyerarxiya prinsipiga ko'ra X_1X_2 o'zaro ta'sir hadi modelda qolsa, X_1 va X_2 asosiy hadlarining biri $p > 0,05$ bo'lsa ham modelda saqlanishi mumkin. Iyerarxik model response surface shaklini to'g'ri ifodalash va optimum prognozini barqaror saqlash uchun muhim.

Model diagnostikasida Cook distance, leverage va studentized residual kabi ko'rsatkichlardan foydalanish tajriba nuqtalari orasida modelga haddan tashqari kuchli ta'sir ko'rsatayotgan nuqtalarni aniqlash imkonini beradi. Bunday nuqtani faqat statistik sabab bilan chiqarib tashlash mumkin emas; avval laboratoriya jurnali, harorat nazorati, pH tuzatish, syentrifugalash yoki spektrofotometr o'lchovi kabi texnik omillar tekshirilishi lozim.

Ko'p javobli optimallashtirishda desirability funksiyasi uchun har bir javobning ahamiyat darajasi alohida belgilanishi mumkin. Masalan, mahsulot tabiiy antioksidant sifatida ishlab chiqilsa TPC va DPPH/FRAP ga yuqori vazn, ekstrakti sanoat konsentrati sifatida ishlab chiqish rejalashtirilsa ekstraksiya



chiqimi va past erituvchi sarfiga yuqori vazn beriladi. Shu yo‘l bilan matematik optimum texnologik maqsadga moslashadi.

Optimum nuqtasining barqarorligini sensitivity analysis orqali tekshirish foydali. Agar harorat ± 2 °C yoki pH $\pm 0,1$ o‘zgarganda prognoz javobi keskin pasaysa, jarayon sanoatda nazorat qilish uchun juda sezgir bo‘lishi mumkin. Aksincha, optimum atrofida keng plato mavjud bo‘lsa, ishlab chiqarishda texnologik og‘ishlarga chidamli rejim tanlanadi. Bu amaliyotda «robust optimum» tushunchasiga mos keladi.

Matematik optimallashtirishdan keyin iqtisodiy va ekologik ko‘rsatkichlarning soddalashtirilgan bahosi maqolaga amaliy qiymat qo‘shadi. 1 kg xomashyoga ferment, suv, elektr energiyasi va ishlov vaqti sarfi; 1 g GAE ekvivalent fenol olishga ketgan shartli resurs sarfi hisoblanishi mumkin. Bu ma’lumotlar turli optimum variantlardan qaysi biri sanoat nuqtai nazaridan afzal ekanini ko‘rsatadi va dissertatsiyaning texnologik yo‘nalishini kuchaytiradi.

RSM asosida olingan optimumni boshqa xomashyo partiyasida tashqi validatsiya qilish maqsadga muvofiq. Chunki meva-sabzavot xomashyosi biologik tabiatga ega bo‘lib, mavsum, nav, yetilish darajasi va saqlash sharoitiga qarab pektin, syellyuloza va fenol tarkibi o‘zgarishi mumkin. Agar ikkinchi partiyada prognoz xatosi keskin oshsa, modelga xomashyoning dastlabki TPC, namlik yoki pektin miqdori kabi kovariatlarni kiritish yoki optimum diapazonini qayta ko‘rib chiqish talab etiladi.

Jarayonning kinetik tahlili RSM natijalarini chuqurlashtiradi. Optimum atrofida 15–30 minut intervallarda namuna olib, TPC yoki maqsadli fenolning vaqt bo‘yicha o‘zgarishi aniqlansa, dastlabki tez ajralib chiqish va keyingi diffuziya bilan cheklangan bosqichlarni farqlash mumkin. Bunday ma’lumot fermentativ gidrolizning texnologik davomiyligini asoslash va ortiqcha ushlab turish vaqtini qisqartirishga yordam beradi.



Sanoatga moslashtirishda batch va semi-continuous rejimlarni taqqoslash ham istiqbolli. Laboratoriyada optimal deb topilgan pH va haroratni reaktorda avtomatik boshqarish, fermentni bir yoki ikki bosqichda qo‘shish, aralashtirish intensivligini substrat qovushqoqligiga moslashtirish jarayonning takrorlanuvchanligini oshiradi. Keyingi tadqiqotlarda fermentni immobilizatsiyalash yoki qayta ishlatish imkoniyati ferment sarfini kamaytirish yo‘li sifatida baholanishi mumkin.

Model mezon	Tavsiya etiladigan talqin
Model p-value	<0,05 — model ahamiyatli
Lack-of-fit	>0,05 — modelga zid tizimli og‘ish aniq emas
R ²	1 ga yaqin bo‘lishi maqbul
Adjusted R ² va Predicted R ²	O‘zaro yaqin; katta tafovut overfitting belgisi
Adequate precision	>4 maqbul signal/shovqin nisbati
CV, %	Kichik qiymat — takrorlanuvchanlik yaxshi

Ko‘rsatkich	Model prognozi	Tasdiqlash tajribasi	Nisbiy xato, %
TPC	kiritiladi	kiritiladi	hisoblanadi
TFC	kiritiladi	kiritiladi	hisoblanadi
DPPH/FRAP	kiritiladi	kiritiladi	hisoblanadi
Ekstraksiya chiqimi	kiritiladi	kiritiladi	hisoblanadi

4. XULOSA

Meva-sabzavot xomashyosidan biologik faol moddalarni fermentativ ekstraksiyalashda ferment konsentratsiyasi, harorat, pH, vaqt va qattiq/suyuq nisbat o‘zaro bog‘langan omillar bo‘lib, ularni RSM yordamida kompleks baholash bir omilli yondashuvga nisbatan ko‘proq axborot beradi.



Box–Behnken yoki Central Composite dizayn asosida ikkinchi darajali polinom qurish, ANOVA, lack-of-fit, adjusted/predicted R^2 va tasdiqlash tajribalari orqali model adekvatligini tekshirish maqola va dissertatsiyaning metodologik ishonchliligini ta'minlaydi.

Ko'p mezonli desirability optimallashtirishda biofaol komponentlar chiqimini maksimallashtirish bilan birga ferment va ekstragent sarfini minimallashtirish sanoatga yaqin texnologik rejimni tanlash imkonini beradi. Real eksperiment ma'lumotlari kiritilganda ushbu qo'lyozma dissertatsiyaning jarayon optimallashtirish bosqichi uchun tayyor IMRAD asos bo'lib xizmat qiladi.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR

1. Stanek-Wandzel N., Zarębska M., Wasilewski T. et al. Evaluation of Cellulase, Pectinase, and Hemicellulase Effectiveness in Extraction of Phenolic Compounds from Grape Pomace. *International Journal of Molecular Sciences*. 2024;25(24):13538. doi:10.3390/ijms252413538.
2. Optimization of enzyme-assisted extraction of anthocyanins from eggplant (*Solanum melongena* L.) peel. *Food Chemistry: X*. 2023;18:100643. doi:10.1016/j.fochx.2023.100643.
3. Phenolic compounds and antioxidants activity of banana peel extracts: Testing and optimization of enzyme-assisted conditions. *Measurement: Food*. 2023;10:100085. doi:10.1016/j.meafao.2023.100085.
4. Poblete J., Aranda M., Quispe-Fuentes I. Efficient Conditions of Enzyme-Assisted Extractions and Pressurized Liquids for Recovering Polyphenols with Antioxidant Capacity from Pisco Grape Pomace as a Sustainable Strategy. *Molecules*. 2025;30(14):2977. doi:10.3390/molecules30142977.
5. Stanek-Wandzel N., Zarębska M., Wasilewski T. et al. Enhancing Phenolic Compound Recovery from Grape Pomace Residue: Synergistic



Approach of Ultrasound- and Enzyme-Assisted Extraction. ACS Omega. 2025;10:23129–23138. doi:10.1021/acsomega.5c01321.

6. Nour V. Optimization of Ultrasonic Enzyme-Assisted Extraction for the Recovery of Phenolic Compounds and Soluble Solids from Apple Pomace. Foods. 2026;15(1):98. doi:10.3390/foods15010098.

7. Pectinase-assisted extraction of red dragon fruit (*Hylocereus polyrhizus*) juice: Process optimization and quality assessment. Food Chemistry Advances. 2026;10:101244. doi:10.1016/j.focha.2026.101244.

8. Ultrasonic-Assisted Enzymatic Extraction: An Innovative Technique for the Obtention of Betalains and Polyphenols from Dragon Fruit Peel. Processes. 2025;13(7):2307. doi:10.3390/pr13072307.

9. β -Glucanase vs cellulase for enzymatic-assisted extraction of phenolic compounds in avocado peels by-products. Food Bioscience. 2025;68:106777. doi:10.1016/j.fbio.2025.106777.

10. Innovative approach for phenolic extract production from pomegranate by-products: Enzymatic liquefaction and ultrafiltration. Food Bioscience. 2025;64:105801. doi:10.1016/j.fbio.2024.105801.

11. Hndeya A.G. Advances in Eco-Friendly Extraction of Fruit Bioactive Compounds: Technologies, Challenges and Future Directions. Analytical Science Advances. 2026;7(1):e70071. doi:10.1002/ansa.70071.

12. Green Extraction of Bioactive Compounds from Plant-Based Agri-Food Residues: Advances Toward Sustainable Valorization. Plants. 2025;14(23):3597. doi:10.3390/plants14233597.

13. Exploring Bioactive Compounds from Fruit and Vegetable By-Products with Potential for Food and Nutraceutical Applications. Foods. 2025;14(22):3884. doi:10.3390/foods14223884.

14. Singleton V.L., Rossi J.A. Colorimetry of total phenolics with phosphomolybdic-phosphotungstic acid reagents. American Journal of Enology and Viticulture. 1965;16:144–158.

15. Brand-Williams W., Cuvelier M.E., Berset C. Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. LWT - Food Science and Technology. 1995;28(1):25–30. doi:10.1016/S0023-6438(95)80008-5.
16. Benzie I.F.F., Strain J.J. The ferric reducing ability of plasma (FRAP) as a measure of antioxidant power. Analytical Biochemistry. 1996;239(1):70–76. doi:10.1006/abio.1996.0292.
17. Box G.E.P., Behnken D.W. Some new three level designs for the study of quantitative variables. Technometrics. 1960;2(4):455–475.

