

# Modeliranje procesa i određivanje efektivnog koeficijenta difuzivnosti vlage tijekom sušenja mrkve i krumpira

---

Planinić, Mirela

Doctoral thesis / Disertacija

2008

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, FACULTY OF FOOD TECHNOLOGY / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Prehrambeno-tehnološki fakultet Osijek**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:109:145003>

Rights / Prava: [Attribution-NonCommercial 4.0 International/Imenovanje-Nekomercijalno 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-11**

REPOZITORIJ

PTFS

PREHRAMBENO-TEHNOLOŠKI FAKULTET OSIJEK

dabar  
DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Food Technology Osijek](#)



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU  
PREHRAMBENO-TEHNOLOŠKI FAKULTET OSIJEK**

**Mirela Planinić**

**MODELIRANJE PROCESA I ODREĐIVANJE EFEKTIVNOG  
KOEFIČIJENTA DIFUZIVNOSTI VLAGE TIJEKOM  
SUŠENJA MRKVE I KRUMPIRA**

**Doktorski rad**

**Osijek, travanj 2008.**

UDK:	66.047: 635.13 + 635.21 (043.3)
Znanstveno područje:	Biotehničke znanosti
Znanstveno polje:	Prehrambena tehnologija
Institucija u kojoj je rad izrađen:	Prehrambena-tehnološki fakultet Osijek
Voditelj rada:	dr.sc. Srećko Tomas, red.prof.
Broj stranica:	165
Broj slika:	96
Broj tablica:	53
Broj literaturnih referenci:	166

Datum obrane: 11. travnja 2008.

**Stručno povjerenstvo za obranu:**

1. dr.sc. Drago Šubarić, red.prof., predsjednik
2. dr.sc. Srećko Tomas, red.prof., član - voditelj
3. dr.sc. Branko Tripalo, red.prof., član

Rad je pohranjen u:

1. NSK
2. GISKO
3. Sveučilišna knjižnica Rijeka
4. Sveučilišna knjižnica Split
5. Sveučilišna knjižnica Pula
6. Sveučilišna knjižnica Zadar
7. Sveučilišna knjižnica Dubrovnik
8. Rektorat J.J. Strossmayera u Osijeku
9. Knjižnica PTF-a

Tema doktorskog rada je prihvaćena na VI. (šestoj) redovitoj sjednici Fakultetskog vijeća Prehrambeno-tehnološkog fakulteta Osijek Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, akademske 2006./07. godine održanoj dana 30. ožujka 2007. godine.

## MODELIRANJE PROCESA I ODREĐIVANJE EFEKTIVNOG KOEFICIJENTA DIFUZIVNOSTI VLAGE TIJEKOM SUŠENJA MRKVE I KRUMPIRA

Istraživan je utjecaj temperature sušenja (60-90 °C) i načina dovođenja topline materijalu (konvekcijski uz fluidizaciju; infracrvenim zračenjem) na kinetiku i efektivni koeficijent difuzije vlage tijekom sušenja i rehidratacije uzoraka mrkve i krumpira, kao i utjecaj izbora jednočlanog matematičkog modela na vrijednosti efektivnog koeficijenta difuzivnosti ( $D_{ef}$ ) vlage procijenjenih prema eksperimentalnim podacima.

Predložena je modifikacija Henderson-Pabisova modela (uvođenjem trećeg parametra,  $N$ ), koja je uz Pageov model dala krivulje sušenja s najmanjim odstupanjima od eksperimentalnih podataka za sve pokuse sušenja i rehidratacije.

Procijenjene vrijednosti  $D_{ef}$  bile su ovisne o temperaturi i načinu sušenja te o matematičkom modelu, a neovisne o vrsti povrća za oba procesa difuzije. Vrijednosti procijenjene iz parametara Henderson-Pabisova modela i njegove modifikacije (prema prijedlogu Dincer-Dosta) bile su i do 30 puta veće u odnosu na vrijednosti određene prema pojednostavljenom Fikovom, Lewisovom i Pageovom modelu. Određeno *kritično vrijeme* ( $t_k$ ) najvjerojatnije odgovara vremenu u procesu sušenja/rehidratacije kada dolazi do promjene prevladavajućeg mehanizma difuzije vlage.

Sušenje i rehidratacija očekivano su uzrokovali promjene kvalitativnih svojstava povrća u odnosu na svježe povrće, pri čemu je značajnost utjecaja temperature i načina sušenja na pojedina svojstva bile različita. Općenito, "stroži" uvjeti sušenja utjecali su na pad rehidrationske sposobnosti i smanjenje ukupne promjene boje, te na povećanje sadržaja ukupnih fenolnih tvari u sušenom povrću.

**Ključne riječi:** sušenje, rehidratacija, efektivni koeficijent difuzivnosti, modeliranje kinetike, povrće

## **PROCESS MODELLING AND ESTIMATION OF EFFECTIVE MOISTURE DIFFUSION COEFFICIENT OF CARROT AND POTATO DURING DRYING**

Influence of drying temperature (60-90 °C) and heating method (fluid-bed, infrared) on drying/rehydration kinetics and effective diffusion coefficient ( $D_{ef}$ ) of vegetables were investigated. Choose of mathematical model for assessment of  $D_{ef}$  was tested, too.

Drying and rehydration data are the best describes by proposed modification of Henderson-Pabis model that include addition parameter ( $N$ ) and by Page model at all experimental runs.

The estimated values of  $D_{ef}$  are depending on drying temperature, draying method and on mathematical model from which are derived as well as vegetable independent for both diffusion processes. Values estimated from Henderson-Pabis model and its modification were up to 30 times enhanced than values approximated by Fick, Lewis and Page models. The critical time ( $t_k$ ), which probably correspond to drying/rehidration time when change of dominate diffusion mechanisms occurred, was define according to used mathematical models.

Drying and rehydration are expected courses of qualitative properties changes of products in regard to row vegetables. Generally, rigorous drying regimes were purchase products with lower rehidration ability and total colour changes as well as higher content of total phenolic compounds.

**Keywords:** drying, rehydration, effective diffusion coefficient, kinetics modeling, vegetable

*Zahvaljujem se mentoru prof. dr. sc. Srećku Tomasu na predloženoj temi i vodstvu tijekom izrade ovog rada.*

*Veliko hvala Ani Bucić-Kojić, dipl. ing. na nesebičnoj pomoći, konstruktivnim raspravama i prijateljstvu.*

*Zahvaljujem i svim onima koji su mi na bilo koji način pomogli i pružili podršku tijekom izrade ovog rada.*

*Hvala mojoj majci Toni i sestri Marineli na bezgraničnom strpljenju!*

## SADRŽAJ

1. UVOD .....	1
2. OPĆI DIO.....	3
2.1. Sušenje.....	3
2.2. Kinetika sušenja.....	3
2.2.1. Modeliranje kinetike sušenja .....	6
2.3. Difuzija vlage .....	11
2.3.1. Faktori koji utječu na difuzivnost vlage .....	12
2.3.2. Metode procjene/određivanja koeficijenta efektivne difuzije vlage.....	14
2.4. Načini sušenja.....	18
2.4.1. Konvekcijsko sušenje u fluidiziranom sloju.....	18
2.4.2. Infracrveno sušenje.....	18
2.5. Rehidracija.....	19
2.6. Kvalitativna svojstva hrane .....	20
2.6.1. Boja .....	20
2.6.2. Svojstva teksture.....	24
2.6.3. Sadržaj fenolnih tvari i antioksidacijska svojstva.....	26
3. EKSPERIMENTALNI DIO .....	29
3.1. Zadatak rada .....	29
3.2. Materijali .....	29
3.2.1. Povrće .....	29
3.2.2. Kemikalije .....	29
3.2.3. Uređaji .....	30
3.3. Metode.....	30
3.3.1. Određivanje suhe tvari u svježem i sušenom povrću.....	30
3.3.2. Priprema povrća za sušenje .....	31
3.3.3. Sušenje povrća.....	31
3.3.3.1. Konvekcijsko sušenje u fluidiziranom sloju .....	32
3.3.3.2. Infracrveno sušenje .....	33
3.3.4. Rehidracija sušenih uzoraka povrća .....	35
3.3.5. Shematski prikaz provedbe pokusa sušenja i rehidracije povrća.....	35
3.3.6. Matematičko modeliranje krivulja sušenja i rehidracije.....	36
3.3.7. Određivanje koeficijenta efektivne difuzije .....	38
3.3.8. Sušenje povrća prema matematičkim modelima .....	40
3.3.9. Određivanje boje .....	41
3.3.10. Određivanje volumena.....	43
3.3.11. Određivanje teksturalnih svojstava.....	43
3.3.12. Određivanje sadržaja ukupnih fenolnih tvari i njihove antioksidacijske aktivnosti .....	44
3.3.12.1. Ekstrakcija ukupnih fenolnih tvari.....	44



3.3.12.2.	Određivanja sadržaja ukupnih fenolnih tvari u ekstraktima .....	45
3.3.12.3.	Određivanje antioksidacijske aktivnosti ekstrakata .....	46
4.	REZULTATI .....	48
4.1.	Sušenje .....	48
4.1.1.	Sušenje krumpira .....	49
4.1.1.1.	Konvekcijsko sušenje krumpira u fluidiziranom sloju [FB_K] .....	49
4.1.1.2.	Infracrveno sušenje krumpira [IR_K] .....	53
4.1.2.	Sušenje mrkve .....	57
4.1.2.1.	Konvekcijsko sušenje mrkve u fluidiziranom sloju [FB_M] .....	57
4.1.2.2.	Infracrveno sušenje mrkve [IR_M] .....	61
4.1.3.	Utjecaj načina i temperature sušenja na procijenjene parametre matematičkih modela sušenja .....	65
4.1.4.	Vrijednosti koeficijenta efektivne difuzije vlage za sušenja .....	70
4.1.5.	Vrijednosti Biotova broja i koeficijenta prijenosa tvari kod sušenja .....	74
4.1.6.	Pelegova konstanta inicijalne brzine sušenja ( $K_1$ ) u odnosu na koeficijent efektivne difuzije i maksimalnu brzinu sušenja .....	75
4.2.	Rehidracija .....	76
4.2.1.	Rehidracija krumpira .....	77
4.2.1.1.	Rehidracija krumpira sušenog konvekcijskim načinom u fluidiziranom sloju .....	77
4.2.1.2.	Rehidracija krumpira sušenog infracrvenim sušenjem .....	81
4.2.2.	Rehidracija mrkve .....	85
4.2.2.1.	Rehidracija mrkve sušene konvekcijski u fluidiziranom sloju .....	85
4.2.2.2.	Rehidracija mrkve sušene infracrvenim sušenjem .....	89
4.2.3.	Utjecaj načina i temperature sušenja na procijenjene parametre matematičkih modela rehidracije .....	93
4.2.4.	Vrijednosti (rehidracijskog) efektivnog koeficijenta difuzije vlage .....	98
4.2.5.	Vrijednosti Biotova broja i koeficijenta prijenosa tvari kod rehidracije .....	101
4.3.	Određivanje kvalitativnih svojstava povrća .....	103
4.3.1.	Krumpir .....	104
4.3.1.1.	Rehidracijska svojstva sušenih uzoraka krumpira .....	104
4.3.1.2.	Boja svježih, sušenih i rehidratiranih uzoraka krumpira .....	105
4.3.1.3.	Volumena svježih, sušenih i rehidratiranih uzoraka krumpira .....	108
4.3.1.4.	Teksturalna svojstva svježih, sušenih i rehidratiranih uzoraka krumpira .....	109
4.3.1.5.	Sadržaj ukupnih fenolnih tvari i njihova antioksidacijska aktivnost u ekstraktima krumpira .....	110
4.3.2.	Mrkva .....	112
4.3.2.1.	Rehidracijska svojstva sušenih uzoraka mrkve .....	112
4.3.2.2.	Boja svježih, sušenih i rehidratiranih uzoraka mrkve .....	113
4.3.2.3.	Volumen svježih, sušenih i rehidratiranih uzoraka mrkve .....	116
4.3.2.4.	Teksturalna svojstva svježih, sušenih i rehidratiranih uzoraka mrkve .....	117
4.3.2.5.	Sadržaj ukupnih fenolnih tvari i njihova antioksidacijska aktivnost u ekstraktima mrkve .....	118

5. RASPRAVA.....	121
5.1. Sušenje povrća.....	121
5.1.1. Matematičko modeliranje kinetike sušenja .....	123
5.2. Rehidracija sušenog povrća.....	126
5.2.1. Matematičko modeliranje kinetike rehidracije .....	127
5.3. Koeficijent efektivne difuzije.....	129
5.4. Biotov broj i koeficijent prijenosa mase.....	132
5.5. Kritično vrijeme.....	136
5.6. Promjene svojstava povrća uzrokovane sušenjem/rehidracijom .....	145
6. ZAKLJUČCI .....	153
7. LITERATURA.....	156

## POPIS OZNAKA, KRATICA I SIMBOLA

### OZNAKE

---

$a$	parametar Tomasova modela
$AA$	antioksidacijska aktivnost, $g_{DPPH}/g_{st}$
$a^*$	parametar CIE- $L^*a^*b^*$ sistema za boje
$A, B$	karakteristični parametri
$a_1, a_2, a_3$	karakteristične konstante
$Abs$	apsorbancija svjetlosti
$b^*$	parametar CIE- $L^*a^*b^*$ sistema za boje
$Bi$	bezdimenzijska značajka, Biotov-broj
$BI$	indeks posmeđivanja
$C^*$	parametar boje – zasićenost boje ( <i>crhoma</i> )
$C$	sadržaj ukupnih fenolnih tvari, $g_{GAE}/g_{st}$
$D_{ef}$	efektivni koeficijent difuzivnosti, $m^2/s$
$Di$	bezdimenzijska značajka, Dincerov-broj
$D_o$	Arrheniusov predeksponencijski faktor, $m^2/s$
$E\%$	srednja relativna greška, statistički parametar, %
$E_a$	energija aktivacije, kJ/mol
$EF$	efikasnost modela, statistički parametar
$F$	sila kompresije, N
$FL$	ukupno kvadratno odstupanje, statistički parametar
$Fo$	bezdimenzijska značajka, Fourierov-broj
$G$	„lag-faktor“ – parametar Henderson-Pabisova modela
$h$	parametar boje – ton boje ( <i>hue</i> )
$k$	konstanta Pageova modela, $min^{-1}$
$k'$	konstanta modificiranog Pageova modela, $min^{-1}$
$k''$	konstanta sušenja Tomasova modela, $min^{-1}$
$K_1$	Pelegova konstanta brzine, min
$K_2$	Pelegova konstanta dosega
$K_F$	konstanta pojednostavljenog Fickova modela, $min^{-1}$
$K_L$	konstanta Lewisova modela, $min^{-1}$
$k_m$	koeficijent prijenosa mase, m/s
$L$	linearna dimenzija (polovina debljine materijala), m
$L^*$	parametar boje – svjetlina boje ( <i>lightness</i> )
$m$	masa, kg
$MEB$	srednje apsolutno odstupanje, statistički parametar
$n$	bezdimenzijski parametar Pageova modela
$n'$	bezdimenzijski parametar modificiranog Pageova modela
$n''$	parametar Tomasova modela
$r$	polumjer, m
$R$	opća plinska konstanta, kJ/(mol K)
$R$	koeficijent korelacije, statistički parametar

$R^*$	rehidracijski omjer
$Re$	bezdimenzijska značajka, Reynoldsov-broj
RMSE	srednje kvadratno odstupanje, statistički parametar
$S$	konstanta sušenja Henderson-Pabisova modela, $\text{min}^{-1}$
$t$	vrijeme, min
$T$	apsolutna temperatura, K
$u$	brzina strujanja fluida, m/s
$V$	volumen, ml
$w$	maseni udio
$WI$	indeks izbjeljivanja
$X$	vlažnost materijala, $\text{kg}_v/\text{kg}_{st}$
$dX/dt$	brzina sušenja, $\text{kg}_v/(\text{kg}_{st} \text{ min})$

#### SIMBOLI

---

$\vartheta$	temperatura, °C
$\nu$	kinematički viskozitet, $\text{m}^2/\text{s}$
$\chi^2$	reducirani chi-kvadrat, statistički parametar
$\Delta E_{ab}$	ukupna promjena boje
$\Phi$	bezdimenzijska vlažnost

#### INDEKSI

---

0	početno stanje
cr	kritično stanje
e	ravnotežno stanje
f	konačno stanje
k	kritično stanje
st	suha tvar
v	voda (vlaga)

#### KRATICE

---

DPPH <sup>*</sup>	2,2-difenil-1-pikrilhidrazil radikal
FB	konvekcijsko sušenje u fluidiziranom sloju
GAE	galna kiselina
I	uzorak povrća I.
II	uzorak povrća II.
III	uzorak povrća III.
IR	infracrveno sušenje (zračenje; područje)
K	krumpir
M	mrkva
r	rehidracija
s	sušenje

## **1. UVOD**

Sušenje je tehnološki proces od posebnog značaja u prehrambenoj industriji. Proviđi se s ciljem prerade i/ili konzerviranja hrane, pri čemu produkt sušenja predstavlja sekundarnu sirovinu za daljnju proizvodnju ili gotov proizvod, odnosno zamjena za svježnu namirnicu (u rehidratiranom obliku). Opće je poznato da je sušenje energetski zahtjevna operacija/proces (7-15% ukupne svjetske energetske potrošnje u industriji [1]) te je zbog ekonomske opravdanosti ovaj proces potrebno provesti u što kraćem vremenu, uz što manji utrošak energije i uz ispunjenje primarnog cilja, tj. dobivanje kvalitetnog produkta sa smanjenim aktivitetom vode i produženim vijekom trajanja.

Fenomeni istodobnog prijenosa topline i tvari (vlage), te fizikalna i strukturna raznolikost i heterogenost prehrambenog materijala čini sam proces sušenja i njegovo proučavanje izrazito složenim. Glavni faktori koji utječu na prijenos (transport) vlage tijekom sušenja poroznog materijala mogu se podijeliti na vanjske (parametri povezani s načinom i režimom sušenja) i unutrašnje faktore (parametri povezani sa svojstvima materijala koji se suši) [1]. Za sušenje prehrambenog materijala karakterističan je izostanak perioda konstantne brzine sušenja (ili je on vrlo kratak) i odvijanje glavine procesa u periodu padajuće brzine sušenja, što upućuje na prisutnost i prevladavanje unutrašnjih otpora prijenosu topline i tvari, a kretanje vlage/vode unutar materijala označava kao faktor koji u najvećoj mjeri kontrolira brzinu sušenja. Brojni su mogući mehanizmi transporta vlage unutar i izvan biološkog materijala od kojih niti jedan u potpunosti ne dominira već se kretanje vlage odvija različitim kombinacijama spomenutih mehanizama [2, 3]. Kako se glavina prijenosa tvari (vlage) iz unutrašnjosti do površine materijala odvija difuzijom [4], ukupnost prijenosa mase (gradijent prijenosu mase) izražava se tzv. *efektivnim difuzijskim koeficijentom*, koji objedinjuje sve mehanizme i predstavlja najvažnije svojstvo prijenosa mase, neophodno za izračunavanje, modeliranje, simuliranje i optimiranje procesa sušenja [5, 6].

Literaturne vrijednosti efektivnog koeficijenta difuzivnosti vlage tijekom sušenja prehrambenih materijala u širem su rasponu vrijednosti od  $1 \cdot 10^{-12}$  m<sup>2</sup>/s do  $1 \cdot 10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s i teško su međusobno usporedive [7]. Razlike između uzoraka pojedinog materijala, metoda obrade uzoraka, metodologije i uvjeta pokusa, metoda obrade i analize rezultata pokusa onemogućuju usporedbu rezultata različitih skupina istraživača. Usprkos mnogim studijama o difuziji vlage, još uvijek nema dovoljno informacija koje bi se mogle direktno primjenjivati u analizi

industrijski procesa. Stoga postoji potreba za razvojem standardne eksperimentalne tehnike i jednostavne analitičke metode za provođenje rutinskog određivanja koeficijenta difuzivnosti [8].

Efektivni koeficijent difuzivnosti najčešće se određuje prema eksperimentalnim podacima uz primjenu analitičkih metoda rješavanja jednostavnih difuzijskih modela proizašlih iz Fickova zakona difuzije (podrazumijevaju konstantnu difuzivnost) [1, 5, 6] ili numeričkim rješavanjem složenijih matematičkih modela koji u obzir uzimaju promjenu volumena materijala [9-11].

Svrha sušenja (najčešće) je produživanje trajnosti namirnice i olakšavanje njenog skladištenja, dok je cilj rehidracije vraćanje vlažnosti dehidratiranom proizvodu. Međutim, zbog fenomena histereze [12, 13], brzina i doseg rehidracije ujedno se mogu promatrati i kao „mjera“ promjena izvorne sirovine uzrokovane dehidracijom općenito. Premda je rehidracija važna za optimiranje oba procesa (i dehidracije i rehidracije), literaturni podaci o istraživanjima njene kinetike su oskudni u odnosu na proučavanja procesa sušenja [14-16].

Kako je temperatura sušenja (uz vlažnost i strukturu materijala) parametar s najvećim utjecajem na kinetiku sušenja i rehidracije, te uz vrijeme sušenja značajno utječe na strukturne promjene i kvalitetu proizvoda, cilj ovog rada je bio odrediti utjecaj temperature sušenja i načina dovođenja topline materijalu na kinetiku i efektivni koeficijent difuzivnosti vlage tijekom sušenja i rehidracije mrkve i krumpira, kao i utjecaj primjene različitih metoda analize eksperimentalnih rezultata na vrijednost efektivnog koeficijenta difuzivnosti.

## **2. OPĆI DIO**



## 2.1. Sušenje

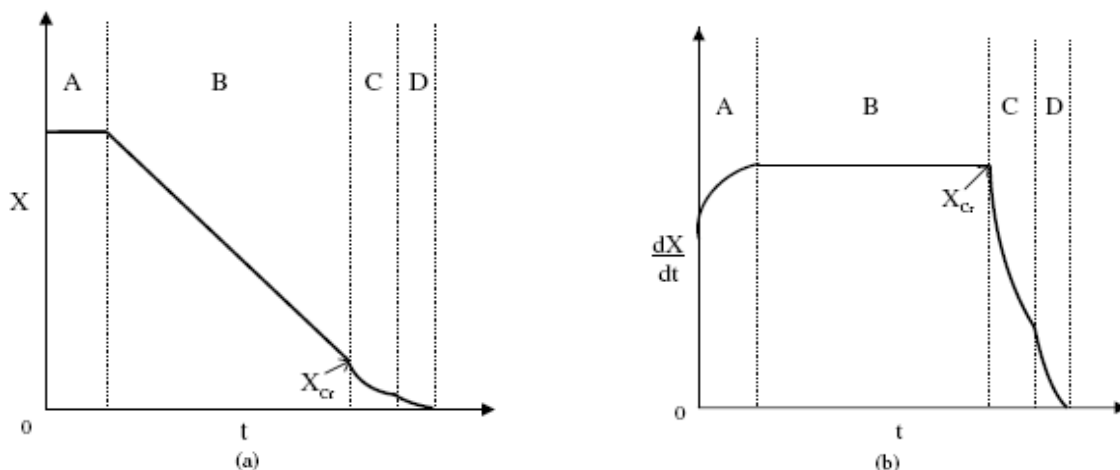
Sušenje je u praksi najčešće upotrebljavana metoda uklanjanja vlage iz čvrstog materijala, a podrazumijeva proces isparavanja vlage i njeno odvođenje s površine materijala što se može odvijati pod vakuumom ili češće uz posredovanja fluida koji struji kroz/preko vlažnog materijala. Ovaj proces nalazi široku primjenu u cjelokupnoj industriji, od sušenja drvene mase u drvnoj industriji sve do sušenja prehrambenog materijala u prehrambenoj industriji. Općenito, sušenje podrazumijeva dovođenje topline vlažnom materijalu putem vanjskog izvora topline, (bilo kondukcijskim, konvekcijskim ili radijacijskim mehanizmom izmjene topline) ili se toplina generira unutar čvrstog materijala kao posljedica njegovog električnog otpora, ili se materijal zagrijava kombinacijom navedenih načina izmjene topline. Međutim, bez obzira na primijenjeni način zagrijavanja materijala, vlaga se s površine vlažnog materijal tijekom sušenja uvijek uklanja u obliku vodene pare. Slijedom navedenog, sušenje je proces koji podrazumijeva istodobne prijenose topline i tvari (vlage), čije brzine ovise o postavljanim procesnim parametrima, odnosno o procesnim uvjetima i karakteristikama vlažnog materijala. Sušenje je energetski vrlo zahtjevna operacija (proces) te ju je važno voditi na način da se u konačnici dobije kvalitetan i siguran proizvod uz što manji utrošak energije. Upravo poznavanje mehanizama u procesu sušenja može omogućiti primjenu metoda kojima se može povećati brzina sušenja i/ili poboljšati kvaliteta gotovog proizvoda i/ili zadržati prehrambena vrijednosti ishodne sirovine u što većoj mjeri.

## 2.2. Kinetika sušenja

Kinetika sušenja podrazumijeva promjenu sadržaja vlage u materijalu i temperature materijala tijekom njegovog sušenja. Uopćene krivulje pomoću kojih se može opisati kinetika različitih procesa sušenja nazivaju se krivuljama sušenja i uobičajeno jasno prikazuju dva ili više perioda sušenja. Ovisno o metodi i uvjetima sušenja te svojstvima vlažnog materijala, ovi periodi mogu biti više ili manje naglašeni na krivuljama sušenja, odnosno neki mogu i u potpunosti izostati, što će ovisiti o prevladavajućim mehanizmima prijenosa topline i tvari, koji potiču odnosno ograničavaju brzinu uklanjanja vlage. Vlaga (voda) u vlažnom materijalu može biti prisutna u nekoliko oblika: kao slobodna („nevezana“) vlaga u obliku kapljevine i/ili pare (ispunjava pore materijala ili slobodni prostor između čestica), kao mehanički vezana vlaga (ispunjava pore s polumjerom  $< 0,1$  mm) i kao kemijski vezana vlaga, koja je dio strukture same

krutine. Oblik u kojemu je vlaga prisutna u materijalu i njena veza s čvrstom tvari, također će utjecati na mehanizam i brzinu njezinog uklanjanja iz materijala.

Najjednostavniji model kojim se može opisati proces sušenja je tzv. „*two-pore*“ sistem [17], koji poroznost materijala (koji se suši) promatra kao mrežu međusobno povezanih kapilara različitog promjera, tj. kao „široke“ i „uske“ pore). Krivulje sušenja (Slika 2.1) takvog sistema prikazuju tri (četiri) različita perioda procesa sušenja: inicijalni period i period konstantne brzine sušenja (A, B) te dva perioda padajuće brzine sušenja (C, D).



**Slika 2.1** Krivulja sušenja (a) [ovisnost vlažnosti materijala ( $X$ ) o vremenu sušenja ( $dX/dt$ )], i krivulja brzine sušenja (b) [ovisnost brzine sušenja ( $dX/dt$ ) o vremenu sušenja] prema „*two pore*“ modelu gdje je  $X_{cr}$  kritična vlažnost materijala. Slika je preuzeta iz literaturnog izvora [17]

**Inicijalni period - period konstantne brzine sušenja** (Slika 2.1 (A-B)). U ovom periodu sušenja površina materijala je zasićena (prekrivena) vlagom te ona ravnomjerno ispunjava i „široke“ i „uske“ pore. U početku sušenja vlaga iz „širokih“ pora nadomješta nivo vlage u „uskim porama“ te ga na taj način održava konstantnim u ovom periodu sušenja.

Početni (inicijalni) period zagrijavanja materijala (A) traje vrlo kratko vrijeme, a odgovara naglom povećanju temperature uzorka za nekoliko stupnjeva u ovisnosti o uvjetima sušenja. Ukoliko se radi o konvekcijskom sušenju, u ovom periodu temperatura površine uzorka približava se temperaturi koja odgovara temperaturi mokrog termometra zraka (plina) kojim se sušenje provodi te ostaje konstantna tijekom period konstantne brzine sušenja.

Brzina sušenja u periodu konstantne brzine sušenja (B) kontrolirana je tzv. *vanjskim faktorima* (npr. temperatura, brzina strujanja zraka, vlažnost zraka), a neovisna je o sadržaju vlage u vlažnom materijalu. Brzina sušenja se ne mijenja (konstantna je) sve do postizanja tzv. *kritične vlažnosti* ( $X_{cr}$ ) materijala nakon čega završava ovaj period sušenja, brzina sušenja počinje opadati te dolazi do povlačenja nivoa vlage i u „uskim“ porama materijala. Prijelaz iz konstantne u

padajuću brzinu dešava se u trenutku kada brzina prijenosa vlage iz unutrašnjosti materijala do njegove površine više nije izjednačena s brzinom prijenosa vlage s površine materijala u okolinu (tj. postaje manja). Stoga kritična vlažnost materijala nije isključivo karakteristika samog materijala već je ovisna i o vanjskim čimbenicima, koji kontroliraju brzinu i vanjskog i unutarnjeg transporta vlage. Kritična vlažnost prehrambenog materijala je vrlo visoka, npr. kritična vlažnost voća kreće oko  $3,5 - 5,0 \text{ kg}_v/\text{kg}_{st}$ , a povrća  $5,5 - 7,7 \text{ kg}_v/\text{kg}_{st}$  [18], što je u rasponu vrijednosti vlažnosti svježeg voća i povrća te je na taj način značaj kritične vlažnosti materijala i perioda konstantne brzine tijekom sušenja prehrambenih materijala zanemariv, odnosno, vlažnost materijala na završetku inicijalnog perioda uglavnom odgovara početnoj vlažnosti te se ona može ujedno smatrati i kritičnom vlažnosti materijala [19, 20].

Različita istraživanja sušenja prehrambenih proizvoda potvrđuju navedeno, odnosno postojanje perioda konstantne brzine sušenja nije uočeno prilikom istraživanja kombiniranog infracrvenog i konveksijskog sušenja krumpira [21], riže [22], konveksijskog sušenja manga, papaje [23], marelice [24], krumpira [25], kao i kod konveksijskog sušenja paprike u fluidiziranom sloju [26]. Za prehrambene proizvode, ovaj period sušenja dobiva na (relativnoj) važnosti samo u slučajevima kada je početna vlažnost materijala vrlo visoka i/ili kada je npr. kod konveksijskog sušenja „sušeci potencijal“ zraka vrlo nizak. Desomrieux i Decaen [19] su prilikom konveksijskog sušenja samo pri „blagim“ uvjetima sušenja (temperatura zraka  $< 40 \text{ }^\circ\text{C}$ , brzina strujanja zraka  $< 2 \text{ m/s}$ ) zabilježili kratki period, koji bi se gotovo mogao smatrati periodom konstantne brzine, dok se sušenje pri „strožim“ uvjetima odvijalo isključivo u periodu padajuće brzine sušenja. Također, i blanširanje uzoraka mrkve prije sušenja, koje su u svom radu proveli Seow i suradnici [27], utjecalo je na povećanje sadržaja površinske vlage/vode, koja se uklanjala tijekom perioda konstantne brzine sušenja.

***Period padajuće brzine sušenja*** (Slika 2.1 (C-D)). Tijekom ovog perioda sušenja ključnu ulogu imaju tzv. *unutarnji faktori* (npr. priroda, geometrija i debljina materijala, veličina pora) koji ograničavaju brzinu transporta vlage unutar materijala te je brzina sušenja u stalnom opadanju. Prijenos tvari (vlage) je kompleksan te može uključivati: migraciju tekućine pod djelovanjem kapilarnih sila, difuziju tekućine uzrokovanu gradijentom koncentracija, površinsku difuziju, difuziju tekućine-pare u porama materijala ispunjenih zrakom, transport uzrokovan skupljanjem materijala i gradijentom tlaka, te transport uslijed isparavanja-kondenzacije [18].

Period padajuće brzine sušenja također može biti podijeljen na dva ili više perioda (C i D) (Slika 2.1), a prijelaz između njih može biti više ili manje naglašen na krivuljama sušenja. Postojanje više perioda padajuće brzine sušenja ukazuje na promjene utjecaja faktora koji

kontroliraju brzinu prijenosa, ili promjenu broja/tipa „aktivnih“ mehanizama transporta vlage tijekom sušenja, te stoga i na različite vrijednosti efektivno koeficijenta difuzije za pojedine periode. Postojanje više perioda padajuće brzine sušenja zabilježeno je tijekom sušenja različitog biološkog (prehrambenog) materijala, npr. tijekom infracrvenog i mikrovalnog sušenja breskve [28], mikrovalnog sušenja mrkve i krumpira [29], sušenja jabuke [8]. Kapilarni tok, difuzija tekućine i difuzija parne faze su predloženi kao ključni mehanizmi transporta vlage, a debljina materijala, priroda (poroznost, polupropusnost staničnih membrana) i sastav (udio masti i škroba) materijala, prethodna obrada materijala (npr. blanširanje, smrzavanje) te temperatura sušenja kao faktori koji imaju značajan utjecaj na vrijednost efektivnog difuzijskog koeficijenta za *prvi (početni) period padajuće brzine sušenja* [18]. U *drugom (posljednjem) periodu padajuće brzine sušenja* uklanja se tzv. „vezana“ voda (vlaga), a unutarnji temperaturni gradijent (razlika temperature na površini i u sredini materijala) je malen/zanemariv te je u tom slučaju vjerojatna pokretačka sila difuzije parcijalni tlak vodene pare, dok su vrijednosti efektivnog koeficijenta difuzije u ovom periodu za oko 4-8 puta manje nego u prvom periodu padajuće brzine sušenja [18].

### 2.2.1. Modeliranje kinetike sušenja

Matematičko modeliranje je koristan „alat“ za relativno brzo i jeftino procjenjivanje utjecaja različitih sistemskih i procesnih parametara na izlazne varijable procesa uz minimaliziranje broja eksperimentalnih postupaka potrebnih za utvrđivanje utjecaja pojedinog parametra [30]. Proučavanje „osjetljivosti“ procesa na različite procesne parametre i varijable, čijim se promjenama nastoji poboljšati kvaliteta proizvoda, dodatno je olakšano primjenom kompjuterskih simulacija koje ujedno pojednostavljaju dizajniranje, optimizaciju i kontrolu procesa. Matematički modeli su matematički izrazi (ili sustav od nekoliko jednadžbi) koji povezuju zavisne s nezavisnim varijablama promatranog procesa, a pojednostavljeni pristup matematičkom modeliranju (tzv. *short cut* metode), temeljen na eksperimentalnim podacima, daje i jednostavne (poluempirijske) izraze koji ulazne i izlazne varijable procesa povezuju s geometrijskim i/ili fizikalnim karakteristikama promatranog materijala te na taj način značajno štede vrijeme i energiju te omogućuje efikasno predviđanje i opisivanje procesa [31].

Opisivanje složenog procesa sušenja moguće je pomoću matematičkih modela koji povezuju različite mehanizme prijenosa vlage, prijenosa topline i količine gibanja. Dugogodišnja

istraživanja sušenja različitih materijala doprinijela su razvoju većeg broja matematičkih modela različitog stupnja složenosti s različitim brojem pripadajućih parametara. Određivanje efektivnih transportnih parametara uobičajeno se temelji na eksperimentalnim podacima srednjeg sadržaja vlage materijala. Kinetički (difuzijski) modeli koriste se za opisivanje fenomena sušenja, a vrijednosti koje procjenjuju ovise o postavljenom hipotezama modela kao što su: geometrija materijala, konstantna ili promjenjiva fizikalna i transportna svojstva materijala, granični uvjeti, izotermni ili ne-izotermni uvjeti sušenja, i dr. [32]. Ukoliko se proces smatra izoterminim, što podrazumijeva konstantnu i jednoliku temperaturu materijala, dovoljan je samo jedan parametar – koeficijent difuzije za opisivanje kinetike procesa. Zanimljivo je postojanje gradijenta temperature unutar materijala koji se suši, polazište je tzv. modela uniformne temperature, koji su za potpuno opisivanje kinetike sušenja koristi dva parametra – koeficijent difuzije i koeficijent prijenosa topline [33].

Znanstveni radovi iz ovog područja nastoje dati što jednostavnije modele (s malim brojem članova i parametra), koji bi mogli naći primjenu u praksi za olakšanu simulaciju i dizajniranje procesa sušenja hrane. Uglavnom su to empirijski (poluempirijski/poluteorijski) modeli, koji vrlo dobro koreliraju s eksperimentalnim mjerenjima, a predstavljaju analitička rješenja kompleksnih jednadžbi prijenosa topline i mase uz određene pretpostavke kojima se pojednostavljuje njihovo rješavanje, kao što su npr. konstantna temperatura materijala, konstantna difuzija vode u materijalu ili se zanemaruje promjena volumena materijala [34]. Njihovi parametri procjenjuju se za određene materijale i određene (eksperimentalne) uvjete sušenja, a njihovo fizikalno značenje često nije u potpunosti razjašnjeno ili se ono dovodi u vezu s nekim od transportnih svojstava (difuzija vlage, toplinska vodljivost, koeficijent prijenosa tvari, koeficijent prijenosa topline) samog materijala, a nazivaju se *jednadžbama tankog sloja*.

U literaturi se često, osobito za prehrambene materijale, za opisivanje kinetike sušenja koristi tzv. *konstanta sušenja*, koja objedinjuje sva navedena transportna svojstva materijala, a ovisi i o svojstvima materijala koji se suši (vlažnosti, obliku, debljini) i o svojstvima fluida kojim se sušenje provodi (vlažnost, temperatura, brzina strujanja). Lewis je sugerirao da je, tijekom konveksijskog sušenja poroznih higroskopskih materijala u periodu padajuće brzine sušenja, promjena vlažnosti materijala proporcionalna slobodnoj vlažnosti, odnosno razlici između trenutne i ravnotežne vlažnosti materijala za date uvjete konstantne temperature i vlažnosti zraka (uz veliku brzinom strujanja zraka iznad materijala ili sušenjem materijala u dovoljno tankom sloju). 1921. godine predložio jednostavni eksponencijalni izraz, tzv. **Lewisov model** (*eksponencijalni zakon sušenja*) za opisivanja prijenosa mase, koji predstavlja analogiju Newtonova zakona prijenosa topline prilikom procesa hlađenja:

$$\frac{X - X_e}{X_0 - X_e} = \exp(-K_L \cdot t) \quad (2.1)$$

Konstanta sušenja ( $K_L$ ) izračunava se (empirijski) regresijskom analizom, odnosno aproksimacijom eksperimentalni podataka s Lewisovom jednažbom tankog sloja te je prema izrazu (2.1) predložio i jednažbu za izračunavanje brzine sušenja kako slijedi:

$$-\frac{dX}{dt} = K_L \cdot (X - X_e) \quad (2.2)$$

Ovaj jednostavni matematički model često je korišten prilikom istraživanja sušenja za modeliranje kinetike sušenja različitih prehrambenih materijala [22, 25, 35-38].

Page (1949.) je predložio empirijsku modifikaciju Lewisova modela dodajući još jedan parametar modela (eksponent vremena  $n$ ) čime je dodatno povećao slaganje mjerenih i izračunatih vrijednosti:

$$\frac{X - X_e}{X_0 - X_e} = \exp(-k \cdot t^n) \quad (2.3)$$

Brojni istraživač koristili su ovaj model (*Pageov model*) za opisivanje kinetike sušenja različitih prehrambenih materijala, te su ga neki istraživači uspoređivali s drugim modelima tankog sloja pri čemu se on pokazao kao najpogodniji za modeliranje sušenja pri različitim uvjetima [25, 37, 39-43].

U literaturi su za modeliranje sušenja korištene i različite modifikacije Pageova modela kao što je (*modificirani Pageov model*):

$$\frac{X - X_e}{X_0 - X_e} = \exp[-(k' \cdot t)^{n'}] \quad (2.4)$$

Ovaj izraz koristili su: Toğrul [36] za modeliranje infracrvenog sušenja mrkve, Akpınar i suradnici [25] za modeliranje konvekcijskog sušenja krumpira, Afaz i Abe [21] za kombinirano infracrveno-konvekcijsko sušenje krumpir, Menges i Ertekin [37] za opisivanje konvekcijskog sušenja šljiva, Maskan [44, 45] za sušenje banana i kivija, itd.

II Fickov zakon difuzije (2.5), Crank (1974.) je smjestio u trodimenzionalni koordinatni sustav uz određene početne i granične uvjete, te zanemarivanje vanjskih otpora i pretpostavku da je koeficijent difuzivnosti konstantan, a izraz je dao u ovisnosti o geometriji materijala koji se suši (za sferični oblik (2.6), za oblik ravne ploče (2.7)).

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D_{ef} \cdot \frac{\partial^2 X}{\partial L^2} \quad (2.5)$$

$$\frac{X - X_e}{X_0 - X_e} = \frac{6}{\pi} \cdot \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n^2} \cdot \exp\left(-\frac{n^2 \cdot \pi^2 \cdot D_{ef}}{r_0^2} \cdot t\right) \quad (2.6)$$

$$\frac{X - X_e}{X_0 - X_e} = \frac{8}{\pi^2} \cdot \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2 \cdot n + 1)^2} \cdot \exp\left[-(2 \cdot n + 1)^2 \cdot \pi^2 \cdot \frac{D \cdot t}{L^2}\right] \quad (2.7)$$

U slučaju dugog vremena sušenja moguće je pojednostavljene jednadžbe (2.7) (za ravnu ploču) uzimanjem samo prvog člana niza i uz pretpostavku da je  $X_e = 0$ , pri čemu se dobiva (pojednostavljeni) **Fickov model** [46]:

$$\frac{X}{X_0} = \frac{8}{\pi^2} \cdot \exp(-K_F \cdot t) \quad (2.8)$$

Prevođenjem izraza (2.8) u linearni oblik (izraz (2.9)) dodatno se pojednostavljuje Fickov zakon, pri čemu se pravcem može prikazati ovisnost eksperimentalno dobivenih vrijednosti ( $X/X_0$ ) o vremenu sušenja u polulogaritamskom prikazu:

$$\ln\left(\frac{X}{X_0}\right) = \ln\left(\frac{8}{\pi^2}\right) - (K_F \cdot t) \quad (2.9)$$

gdje je :

$$K_F = \frac{\pi^2 \cdot D_{ef}}{4 \cdot L^2} \quad (2.10)$$

Ovakav način određivanja efektivnog difuzijskog koeficijentima u svojim istraživanja su koristili brojni istraživači za procese sušenja [16, 25, 36, 37, 42, 47], kao i za procese rehidracije [15, 26, 48-52].

Henderson i Pabis su dodatno modificirali Fickov model, odnosno predložili su jednočlani model s dva parametra,  $G$  i  $S$ , tzv. **Henderson-Pabis model**, koji predstavlja poluempirijsku varijantu teorijskog zakona difuzije:

$$\frac{X - X_e}{X_0 - X_e} = G \cdot \exp(-S \cdot t) \quad (2.11)$$

Ovo dodatno pojednostavljenje osnovnog zakona difuzije (II Fickov zakon) pokazalo se prikladnim za opisivanje kinetike sušenja krumpira [25], luka i brokule [53], šljiva [37], mrkve [39], kao i za opisivanje kinetike rehidracije sušenog karfiola [54], te konvekcijsko sušenje pistača [42].

Tomas [55] je predložio matematički model (proizašao iz bilance topline i mase tvari uz postavljene granične uvjete), koji se može smatrati i svojevrsnom modifikacijom Pageova modela, a uspješno je korišten za modeliranje kinetike konvekcijskog i mikrovalnog sušenja anorganskih materijala [56-60] kao i za opisivanje kinetike konvekcijskog sušenja različitog prehrambenog materijala (ječam, slad, mrkva, kruška, šljiva, jabuka) [61, 62]. Navedeni model dobro je aproksimirao eksperimentalne podatke sušenja, a parametrima modela dano je fizikalno i fenomenološko značenje:

$$X = a \cdot \exp(-k'' \cdot t^{n''}) \quad (2.12)$$

gdje je:  $t \geq 0$ ,  $a > 0$ ,  $k'' > 0$  i  $n'' > 1$ .

Vrijednost parametra modela  $a$  odgovara vlažnosti materijala u vremenu  $t = 0$ , odnosno početnoj vlažnosti materijala, a parametri  $k''$  i  $n''$  su odgovarajuće konstante sušenja ovisne o uvjetima procesa, svojstvima materijala i dominantnim mehanizmima prijenosa topline i tvari. Uvrštavanjem početne vlažnosti materijala u izraz (2.12), model se može pisati kao:

$$X = X_0 \cdot \exp(-k'' \cdot t^{n''}) \quad (2.13)$$

Također, model omogućuje određivanja brzine sušenja u ovisnosti o vremenu sušenja prema izrazu (2.14):

$$\left(-\frac{dX(t)}{dt}\right) = n'' \cdot k'' \cdot t^{(n''-1)} \cdot X(t), \quad (2.14)$$

te prvu ( $k_1$ ) i drugu ( $k_2$ ) kritičnu točku sušenja, koje predstavljaju maksimum funkcije, odnosno točku fleksije funkcije (2.14):

$$t_{k_1} = n'' \sqrt{\frac{n''-1}{k'' \cdot n''}}, \quad X_{k_1} = X_0 \cdot \exp\left(\frac{1-n''}{n''}\right), \quad (2.15)$$

$$t_{k_2} = n'' \sqrt{\frac{2 \cdot n''-1}{k'' \cdot n''}}, \quad X_{k_2} = X_0 \cdot \exp\left(\frac{1-2 \cdot n''}{n''}\right), \quad (2.16)$$

Među empirijskim modelima dostupnim u literaturi često je prisutan i dvoparametrski neeksponecijalni *Pelegov model*, kojeg je Peleg [63] predložio (bez teorijskih osnova) s ciljem ostvarivanja jednostavnog opisivanja/predviđanja procesa koji uključuju sorpciju vode:

$$X = X_0 \pm \frac{t}{K_1 + K_2 \cdot t} \quad (2.17)$$

gdje je  $K_1$  konstanta brzine sorpcije,  $K_2$  konstanta kapaciteta, a matematički operator „ $\pm$ “ postaje „+“ za procese adsorpcije/rehidratacije, a „-“ u slučajevima desorpcije/sušenja. Peleg je



konstantama  $K_1$  i  $K_2$  dao fizikalno značenje te mogućnost procjene brzine sorpcije ( $dX(t)/dt$ ), inicijalne brzine sorpcije ( $(dX/dt)_0$ ) u vremenu ( $t = 0$ ) i ravnotežne vlažnosti materijala ( $X_e$ ) u vremenu ( $t \rightarrow \infty$ ), kako slijedi:

$$\frac{dX(t)}{dt} = \pm \frac{K_1}{(K_1 + K_2 \cdot t)^2} \quad (2.18)$$

$$\left(\frac{dX}{dt}\right)_0 = \pm \frac{1}{K_1} \quad (2.19)$$

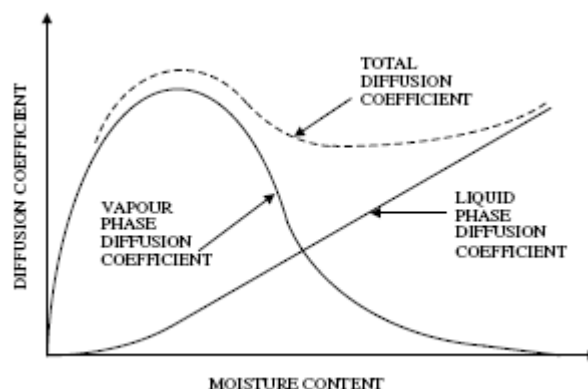
$$X|_{t \rightarrow \infty} = X_e = X_0 \pm \frac{1}{K_2} \quad (2.20)$$

Pelegov model korišten je u istraživanjima za opisivanje kinetike adsorpcije različitih prehrambenih materijala [64-68], kinetike osmotske dehidracije [41, 69-71], sušenja i rehidracije [72, 73] te kinetike ekstrakcije [74].

### 2.3. Difuzija vlage

Glavnina prijenosa tvari (vlage) iz unutrašnjosti do površine materijala odvija se difuzijom [4]. Difuzija je fizikalni proces tijekom kojeg dolazi do prijenosa mase uslijed koncentracijskog gradijenta. U prehrambenoj industriji difuzija je sastavni dio različitih procesa kao što su npr. ekstrakcija izluživanjem, prženje, konzerviranje hrane fizikalnim i kemijskim procesima i procesi dehidracije. Difuzija plinova, para i tekućine u krutim tvarima je znatno složeniji proces u odnosu na difuziju u fluidima, upravo zbog heterogene strukture čvrstih tvari i njene interakcije s tvari koja difundira [75]. Difuzija u krutim tvarima uključuje molekularnu difuziju, kapilarni tok, Knudsenov tok, hidrodinamički tok i površinsku difuziju. Difuzija tekućine i difuzija pare smatraju se prevladavajućim mehanizmima difuzije, ali niti jedan od navedenih mehanizama u potpunosti ne dominira tijekom procesa sušenja već se kretanje vlage unutar materijala odvija različitim kombinacijama spomenutih mehanizama [2, 3] (Slika 2.2), a ukupnost prijenosa mase kroz materijal izražava se tzv. *efektivnim difuzijskim koeficijentom* ( $D_{ef}$ ), koji objedinjuje sve mehanizme i predstavlja najvažnije svojstvo prijenosa mase, čije je poznavanje neophodno za izračunavanje, modeliranje, simuliranje i optimiranje procesa sušenja [5, 6]. Slijedom navedenog, još uvijek nije razvijena učinkovita teorija difuzije u čvrstim tvarima, a dosadašnja razmatranja uključuju analogiju s toplinskom vodljivošću materijala [76]. Većina istraživača usvojila je difuzijske modele temeljene na različitom rješavanju II Fickova

zakona difuzije za različite oblike čvrstog materijala, koji se osnivaju na obliku beskonačne ili polu-beskonačne ravne ploče (npr. kriška jabuke, file haringe), cilindra (krastavac) ili kugle (zrna kave, sirni gruž).



**Slika 2.2** Ovisnost koeficijenta difuzije vlage o sadržaju vlage u materijalu. Slika je preuzeta iz literaturnog izvora [17]

Efektivni (engl. *effective*) ili ukupni (engl. *apparent*) koeficijent difuzije definira se II Fickovim zakonom difuzije (2.5), bez obzira na prevladavajući mehanizam difuzije [4, 77]. Pojednostavljena metoda određivanja  $D_{ef}$  iz nagiba pravca prema izrazu (2.9) (linearizirani Fickov zakon) može pružiti kvantitativne informacije o prijenosu mase i prevladavajućem tipu difuzije vlage [47]. Početna točka modeliranja je određivanje oblika materijala, prirode samog procesa (dehidratacija, adsorpcija, luženje) i eksperimentalnih uvjeta u skladu s postavljenim početnim i graničnim uvjetima [78].

Ukoliko je difuzija vlage mehanizam koji kontrolira brzinu sušenja, a konstante sušenja iz izraza (2.2) i (2.8) predstavljaju funkciju efektivnog difuzijskog koeficijenta, za materijal u obliku ravne ploče može se pisati [4]:

$$D_{ef} = \frac{4 \cdot K_L \cdot L^2}{\pi^2} \quad (2.21)$$

$$D_{ef} = \frac{4 \cdot K_F \cdot L^2}{\pi^2} \quad (2.22)$$

### 2.3.1. Faktori koji utječu na difuzivnost vlage

Difuzitet vlage, kao i druga svojstva bioloških/prehrambenih materijala, ovisi o svojstvima samog materijala, tj. mijenja se u ovisnosti o sezoni uzgoja, klimatskim i vremenskim uvjetima tijekom uzgoja, sortnim razlikama, stupnju zrelosti, itd.

Razlike u vrijednostima efektivnog difuzijskog koeficijenta unutar jedne vrste hrane (različite sorte i varijante) mogu biti jednake kao i razlike između različitih vrsta hrane. Tako je prema statistički obrađenim literaturnim podacima za koeficijente ukupne difuzivnosti, hrana svrstana u nekoliko skupina [20] od kojih npr. meso, povrće, voće i prehrambeni gelovi čine jednu skupinu tvz. skupinu mekih biljnih tkiva s efektivnim difuzitetom  $\sim 2 \cdot 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s, dok se u skupinu hrane sa čvrstom strukturom ubrajaju neke žitarice (riža) i orašasti plodovi s efektivnim difuzitetom od  $10^{-11}$  m<sup>2</sup>/s.

Nadalje, važna je i priprema materijala za sušenje, jer metoda obrade sirovog materijala značajno utječe na promjenu strukturnih svojstava materijala (kao što su poroznost, stanje staničnih stjenki, raspodjela i veličina pora i prisutnost zraka u njima).

Metodologija provedbe pokusa s ciljem određivanja svojstva difuzivnosti, također značajno utječe na vrijednosti koeficijenta efektivnog difuziteta vlage. Ipak, bez obzira na navedeno, ovisnost difuziteta o apsolutnoj temperaturi sušenja uobičajeno se opisuje Arrheniusovom jednadžbom [78]:

$$D_{ef} = D_0 \cdot \exp\left(\frac{-E_a}{R \cdot T}\right) \quad (2.23)$$

gdje je  $D_0$  Arrheniusov predeksponencijalni faktor,  $E_a$  energija aktivacije za difuziju,  $R$  opća plinska konstanta, a  $T$  (K) je temperatura. Općenito, vrijednosti koeficijenta efektivne difuzije se povećavaju s povećanjem temperature [79]. Međutim, izračunate vrijednosti za  $E_a$  ovisiti će svim gore navedenim faktorima, a  $D_0$  o veličini pora kao parametru strukture materijala [80].

Ovisnost difuziteta o vlažnosti materijala također se može uvesti u Arrheniusovu jednadžbu ukoliko se energija aktivacije ili Arrheniusov faktor smatraju empirijskim funkcijama sadržaja vlage. S porastom vlažnosti materijala povećava se i vrijednost  $D_{ef}$ , tako materijalima s manjim sadržajem vlage odgovara veća  $E_a$  za difuziju vlage, dok se kod poroznih materijala očekuju niže vrijednosti  $E_a$  u odnosu na neporozne materijale [79].

Pojedini istraživači su ove dvije ovisnosti istodobno uvrstili Arrheniusov izraz pri čemu su, za određene materijale, metodom regresijske analize dobili ovisnosti koje uključuju najmanje tri karakteristična parametra, od kojih je prvi (predeksponencijalni) parametar funkcija sadržaja vlage u materijalu. Za slučaj sušenja povrća predložena je slijedeća funkcionalna ovisnost [4]:

$$D_{ef}(X, T) = a_0 \cdot \exp(-a_1/X) \cdot \exp(-a_2/T) \quad (2.24)$$

gdje su  $a_0$ ,  $a_1$  i  $a_2$  karakteristične konstante,  $X$  vlažnost materijala koji se suši, a  $T$  temperatura pri kojoj se odvija sušenje.

### 2.3.2. Metode procjene/određivanja koeficijenta efektivne difuzije vlage

Standardna metoda eksperimentalnog određivanja difuzivnosti vlage do sada nije ustanovljena [77, 79], a korišteno je nekoliko načina određivanja difuzivnosti vlage u čvrstim tvarima, kao što su [4, 20]:

- *metoda sorpcijske kinetike* – metoda se osniva na određivanju brzine sorpcije (adsorpcije/desorpcije) do dostizanja ravnotežnog stanja pri čemu se čvrsti materijal nalazi u kontroliranim uvjetima, te se uz zanemarivanje površinskog otpora prijenosu mase iz Fickova broja (bezdimenzijsko vrijeme sušenja) izračunava ukupni koeficijent difuzije;
- *metoda membrane (permeacijska metoda) – steady-state* metoda koja se primjenjuje na materijal u obliku filma (gelovi, tanki slojevi čvrste hrane), pri čemu se mjeri brzina prodiranja (permeacije) difundirajuće tvari kroz materijal poznate debljine (membranu) uz konstantnu, jasno definiranu koncentraciju (difundirajuće tvari) na površini materijala iz čega se onda izračunava koeficijent difuzije;
- *metode sušenja* – metode koje su praktički jednake procesima sušenja, jer podrazumijevaju izračunavanje difuzivnosti vlage prema eksperimentalnim podacima dobivenim sušenjem materijala u sušionicima (prema krivuljama sušenja), a međusobno se razlikuju s obzirom na metodologiju rješavanja Fickove jednadžbe difuzije. Dije se na:
  - *pojednostavljene metode* – metode koje se temelje na analitičkom rješavanju Fickove jednadžbe za određenu geometriju uzorka (ravna ploča, cilindar, sferični oblik) uz slijedeće pretpostavke: površinska vlažnost materijala je u ravnoteži s okolnim zrakom što podrazumijeva visok koeficijent prijenosa tvari na površini materijala, parametri okolnog zraka su konstantni, difuzivnost vlage je konstantna te neovisna o temperaturi i sadržaju vlage u materijalu,
  - *metoda “regular-regime”* – metoda prema kojoj se sušenja dijeli na tri perioda: period konstantne brzine, penetracijski period i *regular-regime* period, u kojem krivulja sušenja nije ovisna o početnom sadržaju vlage materijala. Koeficijent difuzije mijenja se s promjenom vlažnosti materijala, a sve krivulje sušenja nekog materijala završavaju samo jednom *regular-regime* krivuljom koja sadrži ravnotežnu vlažnost tog materijala. Korištenjem ove metode moguće je u jednom eksperimentu odrediti i difuzivnost ovisnu o koncentraciji [47, 81],

- *numeričko rješavanje - metoda regresijske analize* – metoda regresije može se smatrati uopćavanjem prethodna dva tipa metoda, uz istovremeno izračunavanje više transportnih svojstava (prijenos topline i prijenos tvari) prema eksperimentalno dobivenim podacima;
- *ostale/moderne metode* – metode koje se temelje na suvremenim tehnikama mjerenja/praćenja profila sadržaja vlage, kao što su: metoda praćenja radioaktivnih tvari (*radiotracer method*), nuklearna magnetna rezonanca (NMR) i elektron-spinska rezonanca (ESR).

Dincer je sa suradnicima razvio analitičku metodu opisivanja prijenosa mase kod procesa hlađenja i prženja [82], a potom su to primijenili i na proces sušenja geometrijski pravilnih [83] i geometrijski nepravilnih čvrstih tvari [84]. Autori su predložili primjenu regresijske analize eksperimentalnih podataka uz korištenje Henderson-Pabisova modela te indirektno izračunavanje *Bi*-broja, efektivnog koeficijenta difuzije vlage i koeficijenta prijenosa tvari iz dobivenih vrijednosti tzv. lag-faktora [54] i koeficijenta sušenja [69]. Također su potvrdili i mogućnost korištenja izračunatih koeficijenata za predviđanje raspodjele srednje vrijednosti sadržaja vlage materijala za određene uvjete. Ova metodologija [82] podrazumijeva numeričko rješenje Fickova zakona, koje se može pisati u obliku Fourierove jednadžbe nestacionarnog prijenosa topline u kojoj su temperatura i toplinska difuzivnost zamijenjene koncentracijom (vlage) i difuzijom vlage uz definiranje početnih i graničnih uvjeta te se u pojednostavljenom obliku može pisati kao:

$$\Phi = \sum_{n=1}^{\infty} A_n B_n \quad \text{za } 0 < Bi < 100 \text{ i } Bi \geq 100 \quad (2.25)$$

gdje je:

$$\Phi = \frac{X - X_e}{X_0 - X_e} \quad (2.26)$$

$\Phi$  bezdimenzijska vlažnost materijala,  $X$  vlažnost materijala,  $X_e$  ravnotežna vlažnost materijala, a  $X_0$  početna vlažnost materijala.

Za slučaj kada vrijedi ( $\mu_1^2 \cdot Fo > 1,2$ ) jednadžba (2.27) može se dovoljno točno prikazati samo prvim članom niza, tj.:

$$\Phi = A_1 B_1 \quad (2.27)$$

pri čemu za materijal u obliku ravne ploče vrijedi:

$$A_1 = \exp\left(\frac{0,2533 \cdot Bi}{1,3 + Bi}\right) \quad \text{za } 0 < Bi < 100 \quad (2.28)$$

$$B_1 = \exp(-\mu_1^2 \cdot Fo) \quad \text{za } 0 < Bi < 100 \text{ i } Bi \geq 100 \quad (2.29)$$

gdje je  $Bi$  Biotov broj,  $Fo$  Fourierov broj, a  $\mu_1$  parametar koji predstavlja drugi korijen rješenja karakteristične jednačbe, koji se za materijal oblika ravne ploče može izračunati kako slijedi [83]:

$$\mu_1 = \text{atan}(0,640443 \cdot Bi + 0,380397) \quad \text{za } 0 < Bi < 100 \quad (2.30)$$

Vrijednost bezdimenziskog srednjeg sadržaja vlage u materijalu tijekom sušenja može se izraziti i u eksponencijalnoj formi Henderson-Pabisova izraza (2.11) kao:

$$\Phi = G \cdot \exp(-S \cdot t) \quad (2.31)$$

gdje je  $\Phi$  bezdimenzijski sadržaj vlage;  $G$  je bezdimenzijski parametar tzv. *lag-faktor*, koji ukazuje na prisutnost unutrašnjeg i/ili vanjskog otpor prijenosu vlage kao funkcije  $Bi$  broja;  $S$  koeficijent sušenja; a  $t$  je vrijeme.

Izjednačavanjem jednačbi (2.27-31), dobiva se:

$$G = \exp\left(\frac{0,2533 \cdot Bi}{1,3 + Bi}\right) \quad (2.32)$$

$$S \cdot t = \mu_1^2 \cdot Fo, \quad (2.33)$$

te uz uvođenje definicija Fourierova broja:

$$Fo = \frac{D_{ef} \cdot t}{L^2}, \quad (2.34)$$

i Biotova broja:

$$Bi = \frac{k_m \cdot L}{D_{ef}}, \quad (2.35)$$

dobivaju se izrazi za izračunavanje efektivnog difuzijskog koeficijenta ( $D_{ef}$ ) i koeficijenta prijenosa vlage ( $k_m$ ) koji glase:

$$D_{ef} = \frac{S \cdot L^2}{\mu_1^2} \quad (2.36)$$

$$k_m = \frac{D_{ef}}{L} \cdot \left[ \frac{1,3 \cdot \ln(G)}{0,2533 - \ln(G)} \right] \quad (2.37)$$

gdje je  $L$  linearna dimenzija, što u slučaju materijala u obliku ravne ploče iznosi polovinu debljine materijala koji se suši.

U svojim daljnjim istraživanjima Dincer i suradnici koriste literaturne podatke sušenja različitih prehrambenih materijala za potvrđivanje predložene analitičke metode te daju novi (razvijeni) izraz za izračunavanje  $\mu_1$  i postavljaju korelacije između bezdimenzionalnih značajki  $Bi-Re$  [85] i  $Bi-Di$  [86], te između korelacije  $Bi-G$  i  $D_{ef}-S$  [1, 84] kako slijedi:

$$\mu_1 = -419,24 \cdot G^4 + 2013,8 \cdot G^3 - 3615,8 \cdot G^2 + 2880,3 \cdot G - 858,94 \quad (2.38)$$

$$Bi = 22,55 \cdot Re^{-0,59} \quad (2.39)$$

$$Bi = 24,848 \cdot Di^{-0,375} \quad (2.40)$$

$$Bi = 0,0576 \cdot G^{26,7} \quad (2.41)$$

$$D_{ef} = 0,0004 \cdot S^{1,4531}$$

gdje je  $Re$   $[(u \cdot L)/\nu]$  bezdimenzioni Reynoldsov broj,  $Di$   $[u/(S \cdot L)]$  bezdimenzioni Dincerov broj koji predstavlja odnos brzine strujanja fluida s kojim se sušenje provodi i koeficijenta sušenja,  $u$  je brzina strujanja fluida,  $\nu$  kinematički viskozitet fluida, a  $L$  linearna dimenzija (pola debljine materijala koji se suši).

McMinn [87] koristi predloženu metodologiju uz primjenu  $Bi-G$  korelacije za predviđanje parametara prijenosa vlage kod mikrovalnog sušenja laktoze u prahu te potvrđuje primjenjivost Dincer-Dostove metodologije pri eksperimentalnim uvjetima sušenja. Autori Markić, Ukrainczyk i Tripalo [53] u su svom radu ispitivali primjenjivost  $Bi-Di$  korelacije prijenosa vlage kod konvekcijskog sušenja brokule pri različitim temperaturama sušenja [(50; 60; 75) °C] i brzinama strujanja zraka [(1,2; 1,75; 2,25) m/s]. U radu su potvrdili mogućnost primjene navedene korelacije za opisivanje kinetike sušenja brokule, te su ukazali na (očekivanu) razliku u vrijednostima  $D_{ef}$  dobivenim prema Dincer-Dostovom prijedlogu uz korištenje  $G$  i  $S$  parametara i vrijednostima izračunatim iz konstante sušenja ( $K_L$ ) Lewisova modela prema izrazu (2.2).

## 2.4. Načini sušenja

### 2.4.1. Konvekcijsko sušenje u fluidiziranom sloju

U konvekcijskim sušionicima s fluidizacijom, materijal se suši u struji zagrijanog zraka (plina), koji kroz fluidizacijsku kolonu struji odgovarajućom brzinom dovoljnom da se materijal dovede u tzv. kvazifluidno stanje. S obzirom na relativno veliku brzinu strujanja zraka, potrebnu za ostvarivanje fluidizacije, vanjski otpori prijenosu tvari su zanemarivi te se sušenje odvija pod kontrolom unutrašnjih otpora samog materijala [26]. U takvom sustavu zagrijanog medija za sušenje i materijala koji se suši ostvaruje se vrlo dobar kontakt medija sa svim površinama materijala, što osigurava jednoliko sušenje materijala uz istodobno vrlo brz prijenos topline do površine materijala i prijenos mase sa površine materijala.

Ovakav način sušenja povrća nudi brojne prednosti u odnosu na konvencionalne metode sušenja (konvekcijsko sušenje) koje su u svojim radovima potvrđivali razni istraživači, a najznačajnije od njih su ekonomske prirode, tj. skraćivanje potrebnog vremena sušenja uz dobivanje kvalitetnog proizvoda [88]. Prakash i suradnici [38] su na temelju kvalitete dobivenog produkta (sušene mrkve), nakon sušenja i nakon 120 dana skladištenja, zaključili da je sušenje u fluidiziranom sloju dalo kvalitetniji i stabilniji produkt u odnosu na sušenje u solarnom i mikrovalnom sušioniku. Hatamipour i Mowla [89] su istraživali utjecaj inertnog materijala (veličina čestica, tip materijala, omjer: inertni materijal / materijal koji se suši) na efikasnost fluidiziranog (konvekcijskog) sušenja mrkve, a Reyes i suradnici [16] su ispitivali utjecaj dodatnog mehaničkog agitiranja na kinetiku sušenja uz fluidizaciju. Syahrul i suradnici [90] ispitivali su toplinsku efikasnost diskontinuiranog sušionika s fluidizacijom tijekom sušenja kukuruza.

### 2.4.2. Infracrveno sušenje

Infracrveno zračenje (IR) je dio elektromagnetnog spektra koji općenito obuhvaća zrake valnih duljina od  $0,75 \mu\text{m}$  do  $1000 \mu\text{m}$  dok se dio tog spektra s duljinama vala  $0,1-100 \mu\text{m}$  smatra tzv. *toplinskim zračenjem* [91]. Cjelokupno IR područje dijeli se na blisko IR područje s duljinom vala  $0,75 - 3 \mu\text{m}$  (kratki valovi), srednje IR područje  $3 - 25 \mu\text{m}$  (valovi srednje duljine) i daleko IR područje s duljinom vala  $25 - 1000 \mu\text{m}$  (dugi valovi) [92], a za procesiranje hrane najznačajnije je blisko područje s duljinom vala  $\sim 1 \mu\text{m}$  [93]. Infracrveno zračenje, koje padne na



površinu materijala i bude apsorbirano od strane materijala, uzrokuje promjene vibracije njegovih atoma i molekula što uzrokuje zagrijavanje materijala [92].

Za optimalnu primjenu zračenja kao mehanizma zagrijavanja, bitno je uskladiti valnu duljinu toplinskih zraka koje izvor emitira s apsorpcijskim karakteristikama materijala koji se suši obzirom da je moć prodiranja IR zraka u materijal ograničena njegovim svojstvima [28]. Voda dobro apsorbira infracrvene zrake srednje duljine vala, stoga je ovaj dio spektra prikladan za uklanjanje vode (vlage) iz materijala, tj za sušenje prehrambenog materijala.

Infracrveno sušenje (IR sušenje) ima niz prednosti pred konvencionalnim načinima sušenja pri sličnim uvjetima, kao što su veće brzine sušenja, jednosliko zagrijavanje, manji utrošak energije (visoka efikasnost konverzije električne energije u toplinsku energiju [92]), te zahtijeva manje radnog prostora što sve zajedno proces sušenja čini efikasnijim, a daje proizvod visoke kvalitete [28, 94-96]. Kod konvekcijskog načina sušenja, temperatura materijala koji se suši, ukoliko nema drugog izvora topline, približno je određena temperaturom mokrog termometra zraka/plina kojim se sušenje provodi. U slučaju radijacijskog sušenja, temperatura materijala ne ovisi o okolnoj temperaturi. Kako je zrak uglavnom mješavina dušika i kisika, koji su kao simetrične molekule transparentni za toplinske zrake, energija se direktno od izvora zračenja prenosi do površine materijala koji se suši, bez značajnijeg zagrijavanja okolnog zraka. Pomoću IR sušenja iz materijala se može ukloniti i do 75% početne vlage bez degradacije samog materijala [97].

Razni autori su u svojim istraživanjima primjenjivali IR zagrijavanje materijala tijekom sušenja, bilo samostalno ili u kombinaciji s drugim načinima prijenosa topline [21, 22, 28, 29, 46, 97-99].

## **2.5. Rehidracija**

Doseg (kapacitet) i brzina rehidracije sušene hrane limitirani su brzinom upijanja vode, koja ovisi o samoj hrani (priroda i „povijest“ prehrambenog materijala, veličina/geometrija, boja, sastav, teksturalna svojstva), kao i o uvjetima samog rehidracijskog sustava (rehidracijski medij, temperatura, viskoznost, miješanje). Zbog navedenih razloga proučavanje kinetike i mehanizama rehidracije, kao i utjecaja različitih uvjeta sušenja na upijanja vode, te identificiranje ključnih parametara koji određuju proces rehidracije od velike su važnosti za povećanje kvalitete proizvoda i povećanje ekonomičnosti procesa. Cilj sušenja svakako je dobivanje produkta s produženim vijekom trajanja, koji će nakon rekonstitucije imati

zadovoljavajuća teksturalna, vizualna i senzorska svojstva uz minimalno vrijeme rehidracije, što je naročito važno za instant i „*ready-to-eat*“ proizvode [100, 101].

Tijekom rehidracije istodobno se odvijaju procesi upijanja tekućine u materijal i izluživanja čvrste tvari iz materijala, a povećanje mase tijekom rehidracije je neto rezultat ova dva procesa. Brzina adsorpcije i količina adsorbirane tekućine u suprotnosti su sa stupnjem oštećenja stanične strukture, stoga se rehidracija ne može jednostavno smatrati samo kao reverzibilan proces dehidraciji. Istraživanja kinetike rehidracije, stoga mogu poslužiti i za procjenu nastalih promjena i degradacije uzrokovanih procesima dehidracije, kao i postupcima koji prethode samoj dehidraciji. Međutim, literaturni izvori referiraju relativno mali broj istraživanja rehidracije za razliku od istraživanja procesa dehidracije [14-16, 102].

## 2.6. Kvalitativna svojstva hrane

Upijanje tekućine i izluživanje u vodi topivih sastojaka tijekom rehidracije prati i niz promjena različitih svojstava prehrambenog materijala, kao što su promjene poroznosti, volumena, teksturalnih svojstava, gustoće, boje, i dr. Sva ta svojstva utječu na kvalitetu djelomično i potpuno rehidratirane hrane i vrlo su važni za razvoj novih proizvoda određenih karakteristika ili za poboljšanje kvalitete postojećih sušenih proizvoda. Pojedina kvalitativna svojstva mogu se grupirati u slijedeće skupine [102]:

- strukturalna svojstva (gustoća, poroznost, veličina (promjer) pora, specifični volumen),
- optička svojstva (boja, vanjski izgled),
- svojstva teksture (čvrstoća, tvrdoća, elastičnost),
- mehanička svojstva (staklasto, gumenasto, kristalinično stanje),
- senzorska svojstva (okus, miris, aroma),
- nutritivna (prehrambena) svojstva (sadržaj visokovrijednih tvari, proteina, složenih ugljikohidrata).

### 2.6.1. Boja

Boja je važno optičko svojstvo svježe i prerađene hrane koje se svrstava u skupinu svojstava povezanih s kvalitetom hrane. Iako nije uvijek nužno povezana s nutritivnom vrijednosti, okusom ili funkcionalnim svojstvima hrane, boja hrane ima znatan utjecaj na vizualni doživljaj hrane i njenu prihvatljivost od strane potrošača.

Često je boja svojstvo prehrambenih proizvoda koje se prvo uočava i direktno pretvara u pozitivan ili negativan predznak ukupne kvalitete proizvoda. Također utječe i na potrošačevu percepciju okusa i arome te na njegovu potrebu za kupnjom i konzumiranjem tog proizvoda [103], stoga mnogi proizvođači hrane koriste ovaj psihološki efekat boje kako bi unaprijedili svoje proizvode [104] i povećali njihovu prodaju.

Promjena (originalne) boje hrane pokazatelj je različitih poželjnih/nepoželjnih promjena koje mogu nastati kao posljedica zrenja (voće, povrće), prerade ili kvarenja hrane. Mjerenje/određivanje boje prehrambenih proizvoda jednostavna je i brza nedestruktivna metoda (za razliku od kemijskih analiza) koja omogućuje određivanje i praćenje promjene boje proizvoda tijekom prerađivanja i/ili čuvanja, te daje korisne informacije za kontrolu kvalitete i procesa i proizvoda.

Karakteristična boja hrane može potjecati i od obojenih i od originalno neobojenih sastojaka hrane. Zajedničko kemijsko obilježje obojenih tvari jesu konjugirane nezasićene dvostruke veze, a obojenost je ovisna o njihovom broju i razmještaju. Boja nastaje kao rezultat intenzivnijeg reflektiranja svjetlosnih zraka određenih valnih duljina s njezine površine. Naime, svaki osvjetljeni objekt može ukupnu svjetlost ili dio ukupne svjetlosti koja je pala na njegovu površinu, reflektirati i/ili apsorbirati i/ili propustiti, ovisno o njegovoj prirodi, geometriji i površini, pri čemu se u promatračevom oku stvara dojam određene boje predmeta. U praksi je ta svjetlost ograničena na dio spektra koji je vidljiv ljudskom oku, tj. na elektromagnetne valove duljine vala od 380 do 770 nm [105]. Tako će obojena hrana selektivno apsorbirati vidljivi dio spektra određenih valnih duljina, a propustiti ili reflektirati elektromagnetno zračenje ostalih valnih duljina u tom dijelu spektra. Kada to zračenje dopiše u mrežnicu ljudskog oka, ono će izazvati osjet (kromatske) boje [106].

Tri su osnovna fiziološka obilježja osjeta boje (*Slika 2.3*): ton (engl. *hue*), kromatičnost (engl. *chroma*) i svjetlina (engl. *value*) [105-107]:

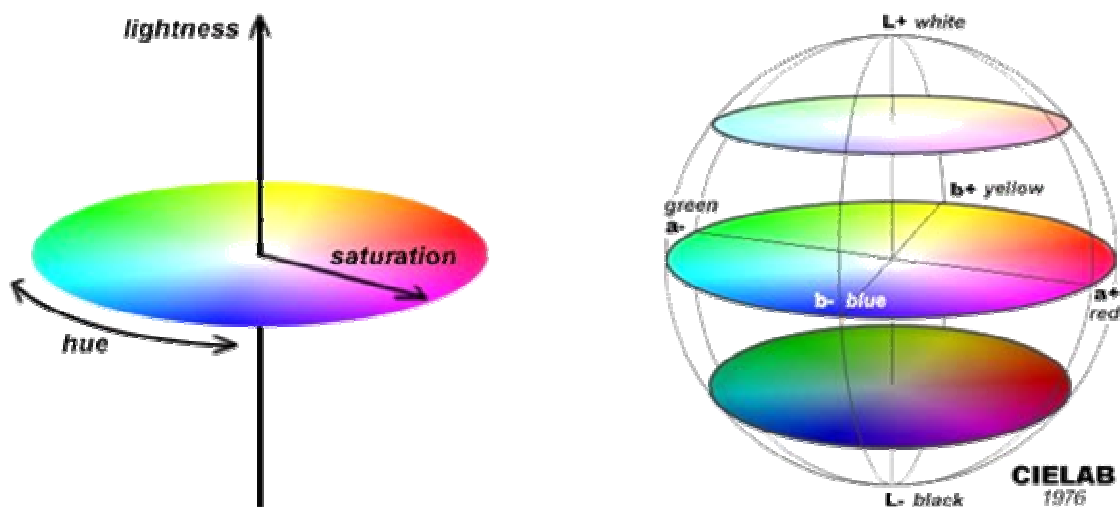
- **ton** (***h*** – ***hue***; boja, oblik boje) – prvo obilježje boje koje se opisuje riječima kao što su zelena, crvena, žuta, plava, limunsko žuta, modro plava, itd. Predstavlja razliku u sposobnosti apsorbiranja svjetlosnih zraka određenih valnih duljina, tj. ukoliko se s površine objekta većim intenzitetom reflektiraju svjetlosne zrake kraćih valnih duljina (400-500 nm) boja predmeta opisuje se kao plava, dok maksimalna refleksija zraka srednjeg ranga duljine vala rezultira zelenom ili žutom bojom, a maksimalna refleksija zraka valnih duljina 600-700 nm daje crvenu boju objektu,
- **kromatičnost** (***C*** - ***chroma***, engl.: *colorfulness*, *saturation*, *purity*, *intensity*; obojenost, zasićenost, intenzitet) – drugo obilježje boje koje opisuje stupanj zasićenosti nekog tona,

tj. određuje koliko ima dominantnog tona u nekom obojenju. Odgovara refleksiji pri određenoj valnoj duljini i ukazuje na to koliko je neka boja različita (udaljena) od sive. S ove točke gledišta, bijela, siva i crna boja su akromatske („nešarene boje“) jer je njihova *chroma* vrijednost, odnosno stupanj zasićenja jednak nuli, dok su ostale boje kromatske („šarene“). Chroma daje svakoj boji određenu dozu jasnoće (engl. *brilliance*) ili bljedila (engl. *dullness*),

- **svjetlina** ( $L$  – *value*, engl.: *lightness*, *brightness*; luminiscencija) – treće fiziološko obilježje koje je analogno radijaciji svjetlosti bez obzira na valnu duljinu, tj. definira razliku između svijetlih i tamnih boja. Identične boje (jednake *hue* vrijednosti) mogu imati različite nivoe svjetline, i pri tome se svjetlija ili tamnija boja može činiti manje obojena od one koja je svijetla, tako npr. idealna bijela površina ima najvišu svjetlinu ( $L = 100$ ) i najnižu kromatičnost ( $C = 0$ ).

Ljudsko oko može razlikovati i do 10 000 000 boja i njihovih nijansa što varira od čovjeka do čovjeka [108]. Kako bi se osiguralo sistematsko i objektivno mjerenje i razlikovanje boja razvijeni su robusni, stabilni, prenosivi mjerni instrumenti (kolorimetri, kromometri) visoke osjetljivosti kojima se lako rukuje, a za mjerenje boje koriste različite matematičke sustave za boju (CIE-xyY, CIE-XYZ, CIE-LUV, CIE- $L^*a^*b^*$ , Hunter-Lab) odobrene od strane Međunarodne komisije za svjetlo i rasvjetu (CIE – *Commission Internationale de l'Eclairage*).

CIE- $L^*a^*b^*$  sustav često nalazi primjenu u prehrambenoj industriji i u istraživanjima koja uključuju prisutnost prirodnih pigmenata (voće, povrće) [103, 104, 109-112]. Iako ovaj sistem ne daje nužno u potpunosti točnu definiciju boje, vrlo je efikasan u određivanju razlike između boja i praćenju promjene boje tijekom procesiranja i skladištenja [110].



**Slika 2.3** Osnovna obilježja boje i prikaz sfernog koordinatnog sustava CIE- $L^*a^*b^*$  sistema boje [107]

U CIE- $L^*a^*b^*$  sistemu određena boja definirana je određenim mjestom u trodimenzionalnom prostoru kojeg predstavljaju tri međusobno okomite osi označene kao  $L^*$ ,  $a^*$  i  $b^*$  (Slika 2.3), pri čemu je:

- $L^*$  koordinata svjetline s podjelom od 0 (crna) do 100 (bijela);
- $a^*$  koordinata obojenja (engl. *chromaticity*) s pozitivnim i negativnim smjerom, tj. vektorom crvene boje,  $+a^*$  (engl. *redness*) i vektorom za komplementarnu zelenu boju,  $-a^*$  (engl. *greenness*);
- $b^*$  koordinata obojenja s pozitivnim i negativnim smjerom:  $(+b^*)$  vektorom žute boje (engl. *yellowness*) i  $(-b^*)$  vektorom komplementarne plave (engl. *blueness*).

Prednost trodimenzionalnog ( $L^*a^*b^*$ ) sistema pred drugim sistemima boje njegova je kompatibilnost s percepcijom ljudskog oka, točnije, udaljenost između dvije točke u koordinatnom sistemu (razlika između dvije boje) izračunava se i definira kao fizikalna vrijednost  $\Delta E_{ab}$  (2.42), koja je ujedno i mjera tolerancije ljudskog oka za razlikovanje boja (Tablica 2.1.).

$$\Delta E_{ab} = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (2.42)$$

**Tablica 2.1** Odnos između izračunate vrijednosti ( $\Delta E_{ab}$ ) i tolerancije ljudskog oka za uočavanje razlike između boja [107]

$\Delta E_{ab}$	oznaka
< 0,2	nije uočljiva
0,2 – 1	vrlo slabo uočljiva
1 – 3	slabo uočljiva
3 – 6	uočljiva
> 6	vrlo uočljiva

Izmjerena  $L^*$  vrijednost direktna je mjera jednog svojstva boje (svjetline), a izmjerene  $a^*$  i  $b^*$  vrijednosti daju mogućnost izračunavanja preostalih dvaju fizioloških obilježja boje prema izrazima (2.43) i (2.44):

- ton boje (*hue*) - izračunava se kao engl. *hue angle*,  $h^*$ :

$$h^* = \tan^{-1}\left(\frac{b^*}{a^*}\right), \quad (2.43)$$

izražava se u stupnjevima u rasponu od  $0^\circ$  do  $360^\circ$  počevši od  $+a^*$  osi pri čemu je  $0^\circ$  = crvena boja,  $90^\circ$  = žuta boja,  $180^\circ$  = zelena boja,  $270^\circ$  = plava boja, a  $360^\circ$  označava crveno-plavu boju;

- kromatičnost – *chroma*,  $C^*$ :

$$C^* = \sqrt{(a^*)^2 + (b^*)^2}, \quad (2.44)$$

vrijednost  $C^*$  mijenja se u rasponu od 0 (tmurna boja) do  $\pm 60$  (živa boja).

Korištenjem sve tri mjerene vrijednosti  $L^* a^* b^*$  sistema, također se mogu izračunati i neki drugi parametri boje kao što su tvz. indeks posmeđivanja – *BI* (engl. *browning index*), i indeks izbjeljivanja – *WI* (engl. *whiteness index*), kako slijedi:

$$\text{➤ } BI = \frac{[100 \cdot (x - 0,31)]}{0,172}, \quad (2.45)$$

$$\text{gdje je: } x = \frac{(a^* + 1,75 \cdot L^*)}{5,645 \cdot L^* + a^* - 3,012 \cdot b^*},$$

$$\text{➤ } WI = 100 - \sqrt{(100 - L^*)^2 + (a^*)^2 + (b^*)^2} \quad (2.46)$$

*BI* predstavlja „čistoću“ smeđe boje te je važan indikator promjene boje koja nastaje u procesima enzimskog i neenzimskog posmeđivanja [103, 104, 111, 112]. *WI* se koristi za određivanje kvalitete papira, a Bolin i Huxol su ga koristili za praćenje formiranja (bijelih) ligninskih tvari na površini mrkve tijekom procesiranja [108].

### 2.6.2. Svojstva teksture

Tekstura hrane može se definirati ako senzorski doživljaj strukture hrane tijekom njenog odgovora (reakcije) na primjenjuju silu, pri čemu su uključena osjetila vida, dodira i sluha. Iako do danas ne postoji u potpunosti zadovoljavajuća definicija teksture, sa velikom sigurnošću može se kazati kako tekstura hrane ima slijedeće karakteristike [113]:

- ubraja se u grupu fizikalnih svojstava koja proizlaze iz strukture hrane, točnije podgrupu mehaničkih ili viskoznih svojstava, pri čemu su ostala fizikalna svojstva (optička, električna, magnetna, toplinska) isključena iz definicije teksture;
- čini je grupa svojstava te se preferira naziv „teksturalna svojstva“ radije nego „tekstura“, budući da uključuje niz parametara kao što su: tvrdoća, čvrstoća, kohezivnost, viskoznost, elastičnost, adhezivnost; veličina, oblik i orijentacija čestica materijala; sadržaj vlage i masti; itd.;
- primarno se doživljava osjetom dodira, obično u ustima, ali i drugi dijelovi tijela mogu biti uključeni (npr. ruke);
- nije povezana s kemijskim doživljajem okusa ili mirisa;
- objektivno mjerenje teksturalnih svojstava podrazumijeva određivanje funkcija triju osnovnih dimenzija: mase (M), duljine (L) i vremena (T) (npr. sila –  $MLT^{-2}$ ).

U nekim slučajevima, prerada hrane usmjerena je ka promjeni njenih primarnih teksturalnih svojstava, u smislu „slabljenja“ njene teksture s ciljem olakšavanja mastikacije dobivenog proizvoda (npr. prerada žitarica u brašno i pekarske proizvode).

Međutim, često čuvanje i prerada (svježe, sirove) hrane, koji se provode s ciljem produženja njene trajnosti, dovode do neželjenih promjena njenih teksturalnih svojstava. Naročito je to izraženo kod voća i povrća, kod kojih su za većinu primarnih teksturalnih svojstava odgovorni stanični zid i središnja lamela, koji su uglavnom građeni od pektina, celuloze, lignina i proteina, te svježem voću i povrću daju čvrstu, hrskavu i sočnu teksturu. Tijekom prerade/procesiranja često dolazi do aktivacije pektin metilesteraze i enzimske degradacije pektina staničnog zida što je jedan od uzroka promjene teksturalnih svojstava. Naročito je to izraženo kod toplinske obrade (smrzavanje, sušenje, pasterizacija), kada npr. sušeno voće i povrće nakon rehidratacije postaje mekše od svježeg [54]. Obzirom da potrošači preferiraju prehrambene proizvode s teksturalnim svojstvima što sličnijim svojstvima ishodne sirovine, mnoga su istraživanja usmjerena k modifikacijama postojećih procesa s ciljem zadržavanja čvrste teksture svježeg voća i povrća u što većoj mjeri [114].

Objektivno određivanje (mjerenje) teksturalnih svojstava hrane provodi se pomoću različitih (specifičnih) mjernih uređaja čiji odabir ovisi o strukturnim svojstvima hrane i o ciljanom svojstvu teksture.

Najčešće se koriste mjerni instrumenti iz skupine instrumenta koji mjere primjenjenu silu (*force measuring instruments*), a podijeljeni su u podskupine s obzirom na metodu mjerenja koju koriste (ubod, ekstruzija, kompresija, torzija, rezanje, ...)

Test jednosmjerne kompresije (*uniaxial compression*) najjednostavnija je i najčešće korištena metoda testiranja krute hrane pomoću univerzalnih test uređaja [113]. Test podrazumijeva primjenu sile okomito na uzorak hrane pri čemu je neophodno da ploha uređaja, kojom se vrši kompresija, bude veće kontaktne površine od površine samog uzorka. Ovaj test se može provoditi na dvije razine, kao:

- nedestruktivni test – podrazumijeva primjenu sile za kompresiju, koja istodobno ne uzrokuje bilo kakva ireverzibilna oštećenja uzorka, to je tzv. „test deformacije“ koji imitira stiskanje hrane u ruci;
- destruktivni test – primjena sile kompresije koja se povećava do nivoa, koji uzrokuje ireverzibilno oštećivanje uzorka, tzv. engl. „*instrumental profile analysis*“, koji oponaša žvakanje hrane.

### 2.6.3. Sadržaj fenolnih tvari i antioksidacijska svojstva

Antioksidanti su sintetičke ili prirodne tvari koje zbog svog visokog redoks potencijala djeluju kao reducirajući agensi te inhibiraju ili sprječavaju oksidaciju drugih molekula.

Sintetički antioksidanti su spojevi fenolne strukture različitog stupnja alkil supstitucije, dok prirodni antioksidanti mogu biti fenolni spojevi (tokoferoli, flavonoidi, fenolne kiseline), spojevi s dušikom (alkaloidi, derivati klorofila, amino-kiseline, amini), karotenoidi ili askorbinska kiselina. Upotreba sintetičkih antioksidanata je potisnuta zbog dokazane kancerogenosti nekih spojeva što je značajno povećalo interes za izvorima prirodnih antioksidanata. Mnogi prirodni antioksidanti (posebno flavonoidi) pokazuju širok spektar biološkoga djelovanja koje uključuje antibakterijsko, antivirusno, protuupalno, antialergijsko, antitrombogeno i vazodilatacijsko djelovanje [115, 116].

Proteklih desetljeća istraživači i proizvođači hrane pokazivali su veliki interes za prirodne fenolne spojeve. Glavni razlog tog interesa je njihovo antioksidacijsko djelovanje, njihova zastupljenost u ljudskoj prehrani i njihova uloga u prevenciji različitih kroničnih bolesti povezanim s „oksidacijskim stresom“ (karcinomi, kardiovaskularne i neurodegenerativne bolesti). Istraživanja su pokazala da povećani unos povrća u ljudski organizam ima zaštitni efekt protiv srčanih bolesti, hipertenzije, katarakta, makularne degeneracije i različitih karcinoma [117-119].

Nekoliko stotina molekula različite fenolne (polifenolne) strukture pronađene su u biljkama uključenim u ljudsku prehranu. Nastaju kao sekundarni metaboliti, a biljkama pružaju



zaštitu od UV-zračenja, mikroorganizama i parazita, ozljeđivanja tkiva, onečišćenog zraka i ekstremnih temperatura [120]. Ovisno o broju fenolnih prstena koje sadrže i strukturnim elementima koji ih povezuju, mogu se podijeliti na: fenolne kiseline, flavonoide, stilbene i lignane. Neke polifenole, kao što je kvercetin, sadrže svi proizvodi biljnog porijekla (voće, povrće, žitarice, leguminoze, voćni sokovi, čaj, kava, vino), neki su specifični za određenu hranu (npr. flavanoni u citrusima), međutim u većini slučajeva, hrana sadrži složenu mješavinu polifenola koji su uglavnom slabo karakterizirani [121]. Navedeno potvrđuju i brojna istraživanja antioksidacijske aktivnosti biljnih ekstrakata prema kojima poznate (karakterizirane) komponente u ekstraktima pokazuju samo dio ukupne antioksidacijske aktivnosti ukupnog ekstrakta [122]. Poznato je da dominirajuće fenolne tvari u mrkvi pripadaju fenolnim kiselinama i *iso*-kumarinima [120], dok se krumpir smatra dobrim izvorom flavonskih aglikona [123].

Fenolne komponente općenito u biljkama mogu biti u slobodnoj formi i u vezanoj formi. Klorigena i kafeinska kiselina su fenolni spojevi koji se nalaze u slobodnoj formi smješteni u staničnim vakuolama te se iz biljnog materijala mogu ekstrahirati vodenim otopinama etanola, metanola, acetona ili njihovom kombinacijom, dok su npr. felurulična kiselina i *p*-kumarna kiselina esterskom vezom vezane s polisaharidima stanične stjenke (vezana forma) te ih je moguće ekstrahirati uz prethodno razaranje stanične stjenke dodatkom kiseline [120, 124, 125]. Kemijska aktivnost fenolnih tvari (polifenola) proizlazi iz njihovog reducirajuće sposobnosti kao vodik- ili elektron-donora što im daje predispoziciju za antioksidacijsko djelovanje. Polifenoli posjeduju idealnu strukturu za „hvatanje“ slobodnih radikala, te je dokazano da su *in vitro* efikasniji antioksidanti u odnosu na C i E vitamine. Također, imaju tendenciju stvaranja kelatnih kompleksa s metalima (osobito željezom i bakrom) čime sprječavaju katalitičko djelovanje metala u formiranju slobodnih radikala [126]. Sposobnost uklanjanja slobodnih radikala uglavnom ovisi o strukturnim svojstvima fenolnih spojeva kao što su energija disocijacije O-H veze, rezonanta delokalizacija fenol radikala (PheO<sup>•</sup>) i steričke smetnje uzrokovane supstituentima na aromatskom prstenu [116].

Koncentracija polifenola u hrani varira ovisno o genetičkim faktorima biljne sirovine (različite sorte i kultivari) te brojnim vanjskim faktorima kao što su agrotehničke mjere, klimatski uvjeti, zrelost prilikom branja, manipulacija poslije berbe, te različiti tehnološki faktori [124, 127], od kojih se neki mogu kontrolirati s ciljem optimiranja njihove koncentracije u prehrambenim proizvodima [121].

Poznato je da prerada (npr. sterilizacija, pasterizacija, dehidratacija) i skladištenje, kao i priprema hrane u domaćinstvu, može značajno smanjiti sadržaj prirodnih antioksidanata. Međutim, tijekom toplinske obrade hrane, osim gubitka nutrijenata, u hrani se odvijaju i druge

kemijske promjene pri čemu mogu nastati ne-nutritivni antioksidanti, koji mogu umanjiti ili nadomjestiti gubitak prirodnih antioksidanata i/ili njihove antioksidativne aktivnosti [127–129]. Takve reakcije su i Millardove reakcije, uvjetovane intenzivnom toplinskom obradom ili produženim skladištenjem, koje daju produkte sa snažnom antioksidacijskom aktivnosti. Ovisno o sastavu prehrambenog materijala i uvjetima procesiranja, Millardovi produkti mogu imati mutageno ili antimutageno djelovanje.

### **3. EKSPERIMENTALNI DIO**

### 3.1. Zadatak rada

Zadatak rada bio je odrediti utjecaj temperature sušenja i načina dovođenja topline materijalu na kinetiku i efektivni koeficijent difuzije vlage tijekom sušenja (svježih) i rehidracije (sušenih) uzoraka mrkve i krumpira, kao i utjecaj izbora matematičkog modela na vrijednosti koeficijenta efektivne difuzije procijenjene prema eksperimentalnim podacima. Nadalje, matematički model koji se pokazao kao najprikladniji za opisivanje kinetike sušenja, korišten je za procjenu vremena sušenja potrebnog za dobivanje sušenog povrća s određenim sadržajem vlage. Uspoređivanjem odabranih kvalitativnih svojstava dobivenih produkata, procijenjeni su utjecaji temperature i načina sušenja na njihove promjene uzrokovane sušenjem i rehidracijom pri pokusnim uvjetima.

### 3.2. Materijali

#### 3.2.1. Povrće

Povrće (mrkva i krumpir) je nabavljeno u lokalnoj trgovačkoj mreži te čuvano na + 4 °C do provođenja pokusa (najviše sedam dana). Istovjetni pokusi sušenja i rehidracije provedeni su na po dva različita uzorka svakog povrća (mrkve i krumpira) s ciljem određivanja kinetike sušenja i rehidracije, kao i efektivnog difuzijskog koeficijenta sušenja i rehidracije. Treći uzorak svakog povrća nabavljen je naknadno za potrebe provođenja pokusa sušenja i rehidracije s ciljem potvrđivanja primjenjivosti dobivenih matematičkih modela i određivanja promjene svojstava povrća tijekom sušenja i rehidracije.

#### 3.2.2. Kemikalije

Tijekom određivanja pojedinih kvalitativnih svojstava povrća (sadržaj ukupnih fenolnih tvari, antioksidacijska aktivnost) korištene su slijedeće kemikalije:

- metanol p.a. (Kemika, Hrvatska),
- kloridna kiselina, 36% (Kemika, Hrvatska),
- galna kiselina (Sigma-Aldrich, USA),
- natrij karbonat p.a. (Kemika, Hrvatska),

- Folin-Ciocalteu reagens (Kemika, Hrvatska),
- 2,2-difenil-1-pikrilhidrazil radikal-D9132 [DPPH<sup>•</sup> radikal] (Sigma-Aldrich, USA).

### 3.2.3. Uređaji

Pokusi sušenja povrća provedeni su na:

- uređaju za konvekcijsko sušenje u fluidiziranom sloju (FB) - *Fluid-bed drier* FBD 2000, Endecotts, UK,
- uređaju za radijacijsko-infracrveno sušenje (IR) - HR 73, Mettler Toledo, Švicarska.

Osim navedenih uređaja za sušenje, za provedbu svih ostalih određivanja i analiza korišteni su i sljedeći uređaji:

- vakuum sušionik - VS50, Kambič, Slovenija,
- vodena kupelj - Julabo SW-23, Julabo,
- centrifuga – Sigma 2-16, Sigma,
- kromametar – Chroma Meter CR 400, Konica Minolta,
- spektrofotometar - UV-visible UV-1700 Shimadzu,
- rotavapor – Rotavapor R-210, Büchi,
- vortex – Vibromix 10, Tehtnica, Slovenija,
- vaga – Tehtnica, Slovenija,
- vaga - Crystal (0,01 g), Italija.

## 3.3. Metode

### 3.3.1. Određivanje suhe tvari u svježem i sušenom povrću

Sadržaj suhe tvari u svježim uzorcima povrća određivan je standardnom metodom sušenja usitnjenog uzorka pri sniženom tlaku (30 mbar) i temperaturi 70 °C do konstantne mase [130]. Sušenje pri navedenim uvjetima provedeno je u ukupnom trajanju od osam sati [30], što je bilo dostatno za postizanje konstantne mase uzorka (mase suhe tvari uzorka). Sadržaj suhe tvari u uzorcima izražen je kao postotni udio suhe tvari u svježem uzorku, kako slijedi:

$$w_{st} = \frac{m(\text{suha tvar})}{m(\text{svježi uzorak})} \cdot 100 \quad [\%] \quad (3.1)$$

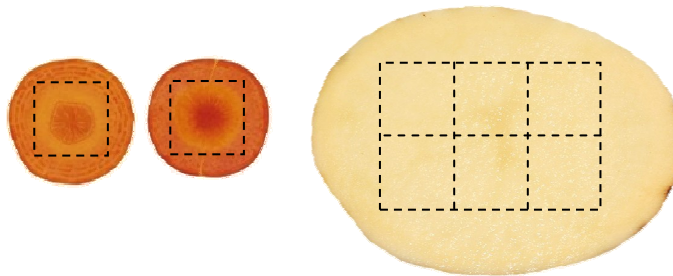
Sadržaj vlage u svježim, sušenim i rehidratiranim uzorcima povrća izračunavan je i izražavan na dva načina, kao vlažnost uzorka,  $X$  (3.2) i kao postotni udio vlage,  $w_v$  (3.3):

$$X = \frac{m(\text{svježi uzorak}) - m(\text{suha tvar})}{m(\text{suha tvar})} \quad [\text{kg}_v/\text{kg}_{\text{st}}] \quad (3.2)$$

$$w_v = \frac{m(\text{svježi uzorak}) - m(\text{suha tvar})}{m(\text{svježi uzorak})} \cdot 100 \quad [\%] \quad (3.3)$$

### 3.3.2. Priprema povrća za sušenje

Neposredno prije sušenja, provedena je kalibracija, pranje i guljenje svježeg povrća, nakon čega je povrće rezano na komadiće ujednačene veličine [(15x15x5) mm]. Povrće je najprije rezano pomoću električnog rezača okomito na dulju os povrća na ploške debljine 5 mm, a potom su ploške rezane ručno na kvadratiće duljine brida ~ 15 mm (*Slika 3.1*). Na taj način dobiveni su ujednačeni komadići povrća s omjerom površina : debljina > 2 [8].



**Slika 3.1** Prikaz načina rezanja ploški povrća (debljine 5 mm) na komadiće kvadratnog oblika veličine ~ (15x15) mm

### 3.3.3. Sušenje povrća

Svježe, prethodno pripremljeno povrće sušeno je pri različitim temperaturama sušenja [(60, 70, 80, 90) °C], pri čemu je toplina potrebna za sušenje uzorcima povrća dovođena na dva različita načina, tj. provedeno je konvekcijsko sušenje u fluidiziranom sloju te radijacijsko sušenje u tankom sloju.

Za potrebe određivanja kinetike sušenja uzoraka mrkve i krumpira, korištena je tzv. termogravimetrijska metoda (metoda sušenje-vaganje) pri čemu se je tijekom provođenja sušenja u određenim vremenski intervalima određivala i bilježila masa uzorka. Prema poznatom sadržaju suhe tvari svježeg povrća i zabilježenim masama uzoraka neposredno prije i tijekom sušenja izračunata je vlažnost sušenih uzoraka u određenom vremenu sušenja, kako slijedi:

$$X(t) = \frac{m(\text{uzorak prije sušenja}) - m(\text{uzorak u vremenu } t)}{[w_{st}(\text{svježe povrće})/100] \cdot m(\text{uzorak prije sušenja})} \quad [\text{kg}_v/\text{kg}_{st}] \quad (3.4)$$

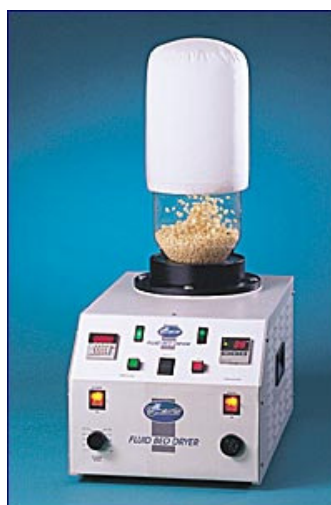
gdje je  $X(t)$  ( $\text{kg}_v/\text{kg}_{st}$ ) vlažnost materijala u vremenu  $t$ ,  $m$  (kg) masa uzorka,  $w_{st}$  (%) udio suhe tvari u svježem povrću.

Poznavanje vlažnosti uzorka u ovisnosti o vremenu sušenja omogućilo je izradu krivulja sušenja. Ovakav način praćenja kinetike sušenja odabran je jer se, prema prijašnjim istraživanjima, primjenom termogravimetrijske metode ostvaruje zadovoljavajuća točnost i ponovljivost pokusa sušenja [8].

Osim praćenja mase uzorka, tijekom infracrvenog sušenja povrća kontinuirano je mjerena i temperatura uzorka te je bilježena u istim vremenskim intervalima kao i masa uzorka. Kod konvekcijskog sušenja u fluidiziranom sloju mjerenje temperature uzorka nije bilo moguće provesti zbog konstrukcije uređaja i načina provedbe sušenja.

### 3.3.3.1. Konvekcijsko sušenje u fluidiziranom sloju

Konvekcijsko sušenje povrća u fluidiziranom sloju provođeno je korištenjem stolnog-laboratorijskog uređaja za konvekcijsko sušenje u fluidiziranom sloju (*Slika 3.2*). Navedeni sušionik sastoji se od postolja i staklene cilindrične posude s (vrećastim) pokrovom od tekstila. Postolje je opremljeno električnim grijačem, ventilatorom te regulatorima i prikazima temperature i brzine strujanja zraka. Staklena posuda se postavlja na postolje sušionika te se u vrlo kratkom vremenu može skinuti i ponovo postaviti na postolje. Materijal koji se suši stavlja se u staklenu posudu koja se potom pokriva pokrovom kako tijekom sušenja ne bi dolazilo do rasipanja i gubitka materijala uslijed fluidizacije.



*Slika 3.2* Prikaz konvekcijskog sušionika s fluidizacijom

Sušenje pripremljenih uzoraka provedeno je u struji zagrijanog zraka (protok i brzina strujanja zraka kroz praznu kolonu iznosili su  $25,6 \text{ dm}^3/\text{s}$ , odnosno  $3,1 \text{ m/s}$ ). Zbog prirode, oblika i veličine pripremljenih uzoraka, tijekom sušenja pri navedenim uvjetima nije bilo moguće ostvariti stabilan fluidizirani sloj materijala, već je ostvarivana fluidizacija slična ključanju (engl. *slugging fluidisation*). Ovaj oblik fluidizacije još uvijek ima karakteristike dobre izmjene topline između zraka i materijala uz ostvarivanje zadovoljavajućeg prijenosa vlage (pare) s površine materijala te jednolikog sušenja materijala po cijeloj površini, što je omogućeno kontaktom svih površina materijala sa zagrijanim zrakom [38].

Prije provođenje svakog pokusa sušenja uređaj za sušenje je zagrijan na odabranu temperaturu sušenja te je na toj temperaturi ostajao uključen najmanje jedan sat prije stavljanja uzorka na sušenje, kako bi se uspostavili željeni uvjeti sušenja.

#### ***Provedba pokusa konveksijskog sušenja povrća u fluidiziranom sloju***

Oko 50 g pripremljenog uzorka povrća stavljanu je u prethodno zagrijanu i izvaganu staklenu posudu sušionika. Posuda je potom pokrivena tekstilnim pokrovom i postavljena na sušionik u pogonu. Istodobno se započinjalo s bilježenjem vremena sušenja. Svakih pet minuta (5 min) provedeno je određivanje mase uzorka koji se suši na način da se posuda s uzorkom skidala s postolja sušionika, vagala te ponovo vraćala na postolje, što sve ukupno nije trajalo duže od 15 s. Za vaganje staklene posude s uzorkom korištena je vaga s osjetljivošću vaganja od 0,01 g uz korištenje određenog načina vaganja (*Mod 2*) kako bi se izbjegla nemogućnost vaganja zbog stalne oscilacije mase uslijed zagrijanosti posude.

Sušenje je prekidano kada više nije bilo promjene mase staklene posude zajedno s uzorkom između dva uzastopna vaganja. Nakon sušenja, uzorak je ohlađen na sobnu temperaturu u desikatoru sa silikagelom, a potom stavljan u posude od tamnog stakla s čepom te čuvan u mraku na sobnoj temperaturi do provođenja postupka rehidracije.

#### **3.3.3.2. Infracrveno sušenje**

Infracrveno sušenje uzoraka mrkve i krumpira provedeno je u laboratorijskom uređaju HR 73 (*Slika 3.3*). Uređaj je opremljen komorom za sušenje s grijačem i integriranom vagom (0,001 g). Grijač je sačinjen od staklene cjevčice ispunjene halogenim plinom, koji se zagrijava putem volframove žice spojene na izvor električne energije. Kontrolna jedinica uređaja konvertira temperaturu sušenja (zadanu putem komandne ploče) u odgovarajući intenzitet elektromagnetnog zračenja, koje grijač u obliku toplinskih zraka (kratkih do srednjih valova)



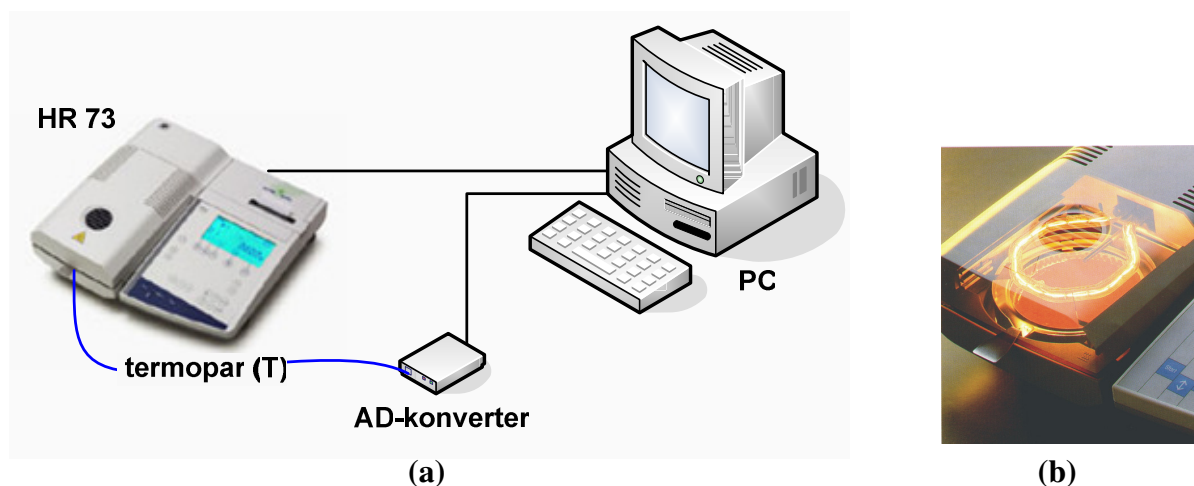
emitira do materijala, koji se postavlja u komoru uređaja. Komora je opremljena i pozlaćenim reflektorom koji (reflektirane) toplinske zrake unutar komore usmjerava prema materijalu koji se suši kako bi se maksimalno iskoristila toplinska energija zračenja.

### *Provedba pokusa radijacijskog sušenja povrća*

Prethodno pripremljeni uzorak povrća stavljan je u jednom sloju na aluminijsku pliticu promjera 7,5 cm, koja je postavljena direktno na integriranu vagu u komoru za sušenje. Uzorak je postavljan na pliticu tako da se nastojalo u potpunosti prekriti površina plitice pri čemu je početna masa uzorka iznosila oko 27 g. Nakon postavljanja uzorka započinjalo se sa sušenjem pri odabranoj temperaturi, koja se prema prikazu na uređaju dostizala unutar 30-60 s i zadržavala nepromijenjenom do kraja sušenja. Masa uzorka kontinuirano je praćena tijekom sušenja te je bilježena *on-line* na osobnom računalu u vremenski intervalima od jedne minute (1 min). Sušenje je automatski prekidano postavljanjem tzv. *switch off* kriterija u trenutku kada je promjena mase uzorka tijekom trideset sekundi sušenja postajala manja od 1 mg.

Tijekom sušenja mjerena je i bilježena (*on-line*) temperatura sušenog uzorka postavljanjem temperaturne sonde (termopar tipa-T brzog odziva (0,025 s), promjer osjetila 0,076 mm, vanjski promjer termopara 0,225 mm, PFA-izolacija, *ungrauded*) u sredinu jednog komadića uzorka. Obzirom na izvedbu termopara, njegovo korištenje nije ometalo niti utjecalo na mjerenje mase uzorka.

Nakon sušenja uzorak je ohlađen na sobnu temperaturu u desikatoru sa silikagelom, a potom stavljan u posude od tamnog stakla s čepom te čuvan u mraku na sobnoj temperaturi do provođenja postupka rehidracije.



**Slika 3.3 (a)** Prikaz infracrvenog sušionika spojenog s računalom; **(b)** Prikaz komore infracrvenog sušionika

### 3.3.4. Rehidracija sušenih uzoraka povrća

Povrće (mrkva i krumpira), sušeno na dva različita načina pri različitim temperaturama (kako je prethodno opisano), rehidratirano je potapanjem u destiliranu vodu u ukupnom trajanju od dva sata (120 min). Rehidracija je provedena u staklenim laboratorijskim čašama (400 cm<sup>3</sup>), koje su s rehidracijskim sadržajem smještane u vodenu kupelj na temperaturu od 26 °C. Za potrebe određivanja kinetike rehidracije korištena je gravimetrijska metoda, tj. periodično određivanje mase rehidratiranih uzoraka. Poznavanje mase uzorka prije i nakon rehidracije te sadržaja suhe tvari svježeg i sušenog povrća omogućilo je izračunavanje vlažnosti rehidratiranog povrća tijekom postupka rehidracije ( $X(t)$ ) i rehidracijskog omjera ( $R^*$ ) [131], kako slijedi:

$$X(t) = \frac{m(\text{rehidratirani uzorak}) - m(\text{suha tvar uzorka})}{m(\text{suha tvar uzorka})} \quad [\text{kg}_v/\text{kg}_{st}] \quad (3.5)$$

$$R^* = \frac{m(\text{rehidratirani uzorak})}{m(\text{sušeni uzorak})} \quad (3.6)$$

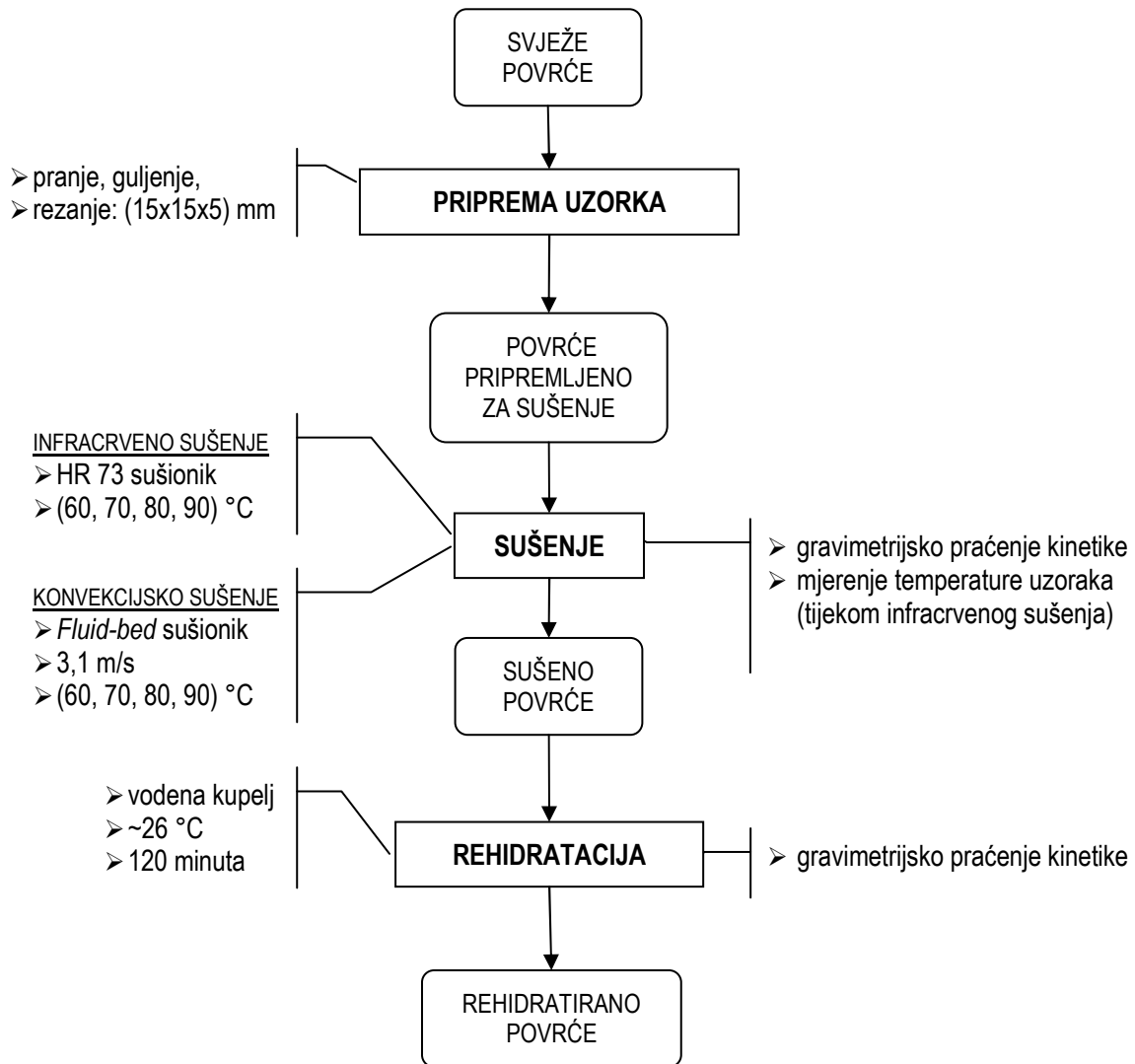
Svaki pokus rehidracije proveden je u dva istovjetna ponavljanja za svaki uzorak povrća sušen pri određenim uvjetima.

#### *Provedba pokusa rehidracije sušenog povrća*

U laboratorijsku čašu, u 100 cm<sup>3</sup> destilirane vode potopljeno je deset reprezentativnih komadića sušenog povrća. Sadržaj čaše je pomoću staklenog štapića promiješan te je čaša smješšana u vodenu kupelj. Svakih deset minuta (10 min) tijekom prvog sata, a potom svakih trideset minuta (30 min) tijekom drugog sata rehidracije sadržaj čaše procijeđen je kroz cjedilo, s površine komadića povrća papirnim ubrusom uklonjen je višak vode, nakon čega su uzorci vagani (0,01 g) te ponovo vraćeni u destiliranu vodu radi nastavka rehidracije.

### 3.3.5. Shematski prikaz provedbe pokusa sušenja i rehidracije povrća

Pokusi, koji su imali za cilj praćenje kinetike sušenja i rehidracije, provedeni su na po dva različita uzorka svake od dvije vrste povrća (mrkve i krumpira) u dva različita uređaja uz četiri temperaturna režima. Svaka serija pokusa provedena je u dva ponavljanja što je rezultiralo s ukupno 64 pokusa sušenja i 64 pokusa rehidracije. Plan izvođenja pokusa prikazan je shematski na slici 3.4.



**Slika 3.4** Shema pokusa sušenja i rehidratacije povrća u svrhu modeliranja kinetike sušenja, odnosno rehidratacije

### 3.3.6. Matematičko modeliranje sušenja i rehidratacije

Eksperimentalni podaci svakog provedenog pokusa sušenja (različita temperatura i način sušenja) i rehidratacije za svaku vrstu povrća izraženi su kao bezdimenzionalna vlažnost ( $\Phi$ ) uzoraka u određenom vremenu sušenja/rehidratacije:

$$\Phi = \frac{X(t) - X_e}{X_0 - X_e} \quad (3.7)$$

gdje je  $X(t)$  vlažnost materijala u vremenu  $t$ ,  $X_e$  ravnotežna vlažnost materijala, a  $X_0$  početna vlažnost materijala (u vremenu  $t = 0$ ).

Međutim, kako je za biološke materijale ravnotežnu vlažnost materijala teško odrediti i zanemarivo je mala uzevši u obzir i primijenjene načine sušenja (konvekcijsko sušenje u fluidiziranom sloju uz brzinu strujanja zraka od ~3,1 m/s i radijacijsko sušenje), za potrebe proračuna ovog rada bezdimenziolana vlažnost uzoraka izračunavala se kao omjer trenutne vlažnosti materijala i početne vlažnosti svježeg materijala:

$$\Phi = \frac{X(t)}{X_0} \quad (3.8)$$

Dobiveni eksperimentalni podaci matematički su obrađeni korištenjem računalnih programskih paketa Microsoft® Office Excel 2003, te Statistica 7.1 (StatSoft, Inc., USA) uz korištenje nelinearne Quasi-Newton regresijske metode izračuna parametara zadanih matematičkih modela sušenja.

Za aproksimaciju eksperimentalnih podataka sušenja upotrijebljeni su sljedeći matematički modeli, koji su već korišteni u istraživanjima sušenja različitih prehrambenih materijala:

$$\text{Fickov (pojednostavljeni) model} \quad \Phi = \frac{8}{\pi^2} \cdot \exp(-K_F \cdot t) \quad (3.9)$$

$$\text{Lewisov model} \quad \Phi = \exp(-K_L \cdot t) \quad (3.10)$$

$$\text{Pageov model} \quad \Phi = \exp(-k \cdot t^n) \quad (3.11)$$

$$\text{modificirani Pageov model} \quad \Phi = \exp[-(k' \cdot t)^{n'}] \quad (3.12)$$

$$\text{Pelegov model} \quad \Phi = \Phi_0 - \frac{t}{K_1 + K_2 \cdot t} \quad (3.13)$$

$$\text{Henderson-Pabisov model} \quad \Phi = G \cdot \exp(-S \cdot t), \quad (3.14)$$

Osim navedenih, predložen je i primijenjen je i matematički model, koji predstavlja modifikaciju Henderson-Pabisova modela, a do sada (prema dostupnim literaturnim podacima) u ovom obliku nije korišten za modeliranje kinetike sušenja:

$$\text{modificirani Henderson-Pabisov model} \quad \Phi = G' \cdot \exp(-S' \cdot t^N) \quad (3.15)$$

Za aproksimaciju eksperimentalnih podataka rehidratacije korišteni isti modeli sušenja pisani u sljedećem obliku:

$$\text{Fickov (pojednostavljeni) model} \quad (1 - \Phi) = \frac{8}{\pi^2} \cdot \exp(-K_F \cdot t) \quad (3.16)$$

$$\text{Lewisov model} \quad (1 - \Phi) = \exp(-K_L \cdot t) \quad (3.17)$$

$$\text{Pageov model} \quad (1 - \Phi) = \exp(-k \cdot t^n) \quad (3.18)$$

$$\text{modificirani Pageov model} \quad (1 - \Phi) = \exp[-(k' \cdot t)^{n'}] \quad (3.19)$$

$$\text{Pelegov model} \quad \Phi = \Phi_0 + \frac{t}{K_1 + K_2 \cdot t} \quad (3.20)$$

$$\text{Henderson-Pabisov model} \quad (1 - \Phi) = G \cdot \exp(-S \cdot t) \quad (3.21)$$

$$\text{modificirani Henderson-Pabisov model} \quad (1 - \Phi) = G' \cdot \exp(-S' \cdot t^N) \quad (3.22)$$

Za ocjenu uspješnosti aproksimacije eksperimentalnih podataka sušenja i rehidracije matematičkim modelima, uz *koeficijent korelacije* korišteni su i slijedeći statistički parametri [24, 36, 37, 132]:

$$\text{ukupno kvadratno odstupanje} \quad \text{FL} = \sum_{i=1}^N (\Phi_{\text{pre},i} - \Phi_{\text{eks},i})^2 \quad (3.23)$$

$$\text{srednje apsolutno odstupanje} \quad \text{MEB} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N (\Phi_{\text{pre},i} - \Phi_{\text{eks},i}) \quad (3.24)$$

$$\text{srednje kvadratno odstupanje} \quad \text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N (\Phi_{\text{pre},i} - \Phi_{\text{eks},i})^2} \quad (3.25)$$

$$\text{efikasnost modela} \quad \text{EF} = \frac{\sum_{i=1}^N (\Phi_{\text{eks},i} - \Phi_{\text{eks,sr}})^2 - \sum_{i=1}^N (\Phi_{\text{pre},i} - \Phi_{\text{eks},i})^2}{\sum_{i=1}^N (\Phi_{\text{eks},i} - \Phi_{\text{eks,sr}})^2} \quad (3.26)$$

$$\text{reducirani chi-kvadrat} \quad \chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (\Phi_{\text{eks},i} - \Phi_{\text{pre},i})^2}{N - n} \quad (3.27)$$

$$\text{srednja relativna pogreška (\%)} \quad \text{E\%} = \frac{100}{N} \cdot \sum_{i=1}^N \left| \frac{\Phi_{\text{eks},i} - \Phi_{\text{pre},i}}{\Phi_{\text{eks},i}} \right| \quad (3.28)$$

### 3.3.7. Određivanje koeficijenta efektivne difuzije

Određivanje koeficijenta efektivne difuzije ( $D_{\text{ef}}$ ) provedeno je prema prethodno procijenjenim parametrima matematičkih modela dobivenih aproksimacijom eksperimentalnih

podataka. Bez obzira na stupanj slaganja mjerenih i izračunatih vrijednosti,  $D_{ef}$  procijenjen je prema parametrima Fickova, Lewisova, Pageova i Henderson-Pabisova modela. Obzirom da je predložena modifikacija Henderson-Pabisova modela pokazala najmanje odstupanje od mjerenih vrijednosti i sva tri procijenjena parametra ovog modela korištena su za određivanje  $D_{ef}$  prema analogiji s Dincer-Dostovim prijedlogom određivanja  $D_{ef}$  iz Henderson-Pabisova modela. Osim  $D_{ef}$ , iz parametara posljednja dva navedena modela određeni su i Biotov broj ( $Bi_m$ ) i koeficijent prijenosa mase ( $k_m$ ). Većina korištenih izraza za izračunavanje  $D_{ef}$  već je prikazana u prethodnom poglavlju, ali radi bolje preglednosti ponovljeni su i u ovom poglavlju (*Tablica 3.1*).

Osim navedenih načina određivanja  $D_{ef}$ , prema dobivenim eksperimentalnim rezultatima i analogiji s Dincer-Dostovim načinom određivanja koeficijenta efektivne difuzije preko Henderson-Pabisova kinetičkog modela, u ovom radu dan je i novi prijedlog za određivanje  $D_{ef}$  i  $k_m$  preko novopredloženog modificiranog Henderson-Pabis modela (*Tablica 3.2*). Način na koji se došlo do predloženih izraza za izračunavanje  $Bi_m$  i  $D_{ef}$  pobliže je objašnjen u poglavlju 4. Rezultati.

**Tablica 3.1** Izrazi za izračunavanje  $D_{ef}$  prema procijenjenim parametrima matematičkih modela

MATEMATIČKI MODEL	MATEMATIČKI IZRAZI
Fick (pojednostavljeni)	$D_{ef} = \frac{4 \cdot L^2 \cdot K_F}{\pi^2}$
Lewis	$D_{ef} = \frac{4 \cdot L^2 \cdot K_L}{\pi^2}$
Page	$D_{ef} = \frac{4 \cdot L^2 \cdot k}{\pi^2}$
Henderson-Pabis	$Bi = 0,0576 \cdot G^{26,7}$ (za IR sušenje i rehidraciju) $Bi = 24,848 \cdot Di^{0,375}$ (za FB sušenje) $Di = \frac{u}{S \cdot L}$ $\mu = \text{atan}(0,640443 \cdot Bi + 0,380397)$ $D_{ef} = \frac{S \cdot L^2}{\mu^2}$ $k_m = \frac{D_{ef} \cdot Bi}{L}$

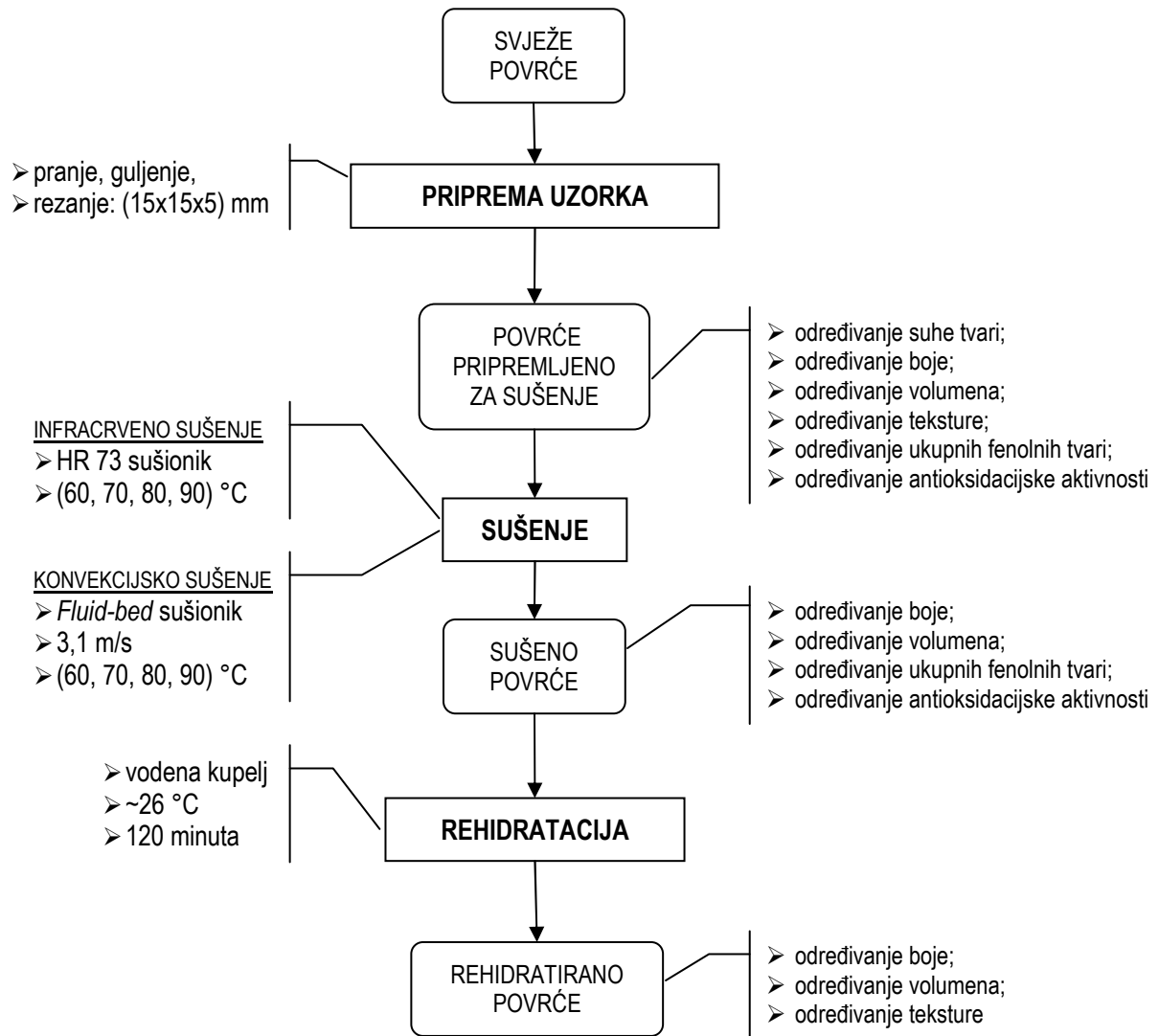
**Tablica 3.2** Predloženi izrazi za izračunavanje  $D_{ef}$  i  $k_m$  prema procijenjenim parametrima modificiranog Henderson-Pabis modela

MATEMATIČKI MODEL	MATEMATIČKI IZRAZI
modificirani Henderson-Pabis	$Bi = 0,1481 \cdot (G' \cdot N)^{5,0192}$ (za IR sušenje i rehidraciju) $Bi = 24,848 \cdot Di^{0,375}$ (za FB sušenje) $Di = \frac{u}{\sqrt[3]{S'} \cdot L}$ $\mu = \text{atan}(0,640443 \cdot Bi + 0,380397)$ $D_{ef} = \frac{\sqrt[3]{S'} \cdot L^2}{\mu^2}$ $k_m = \frac{D_{ef} \cdot Bi}{L}$

### 3.3.8. Sušenje povrća prema matematičkim modelima

Za matematički model, koji je pokazao najbolje slaganje s eksperimentalnim podacima, određene su funkcionalne ovisnosti njegovih parametra o temperaturi sušenja te su one korištene za određivanje potrebnog vremena sušenja (novih uzoraka) mrkve i krumpira, a s ciljem potvrđivanja/odbacivanja mogućnosti njihove primjene za opisivanje i predviđanje procesa sušenja svježeg i rehidracije sušenog povrća (mrkve i krumpira) pri zadanim eksperimentalnim uvjetima. Također, ova serija pokusa imala je za cilj ispitivanje utjecaja temperature sušenja i načina sušenja na promjene svojstava povrća, koje su mogle nastati kao posljedice procesa sušenja i rehidracije.

Priprema uzoraka, te sušenje i rehidracija provedeni su na prethodno opisani način uz korištenje matematičkih modela za određivanje potrebnog vremena sušenja za koje će se početna vlažnost svježeg povrća smanjiti na 10%-tni sadržaj vlage. Prilikom provedbe ovog dijela eksperimentalnog rada novonabavljeni uzorci mrkve i krumpira sušeni su višekratno (zbog malog kapaciteta sušionika) pri određenim uvjetima sušenja kako bi se dobila dostatna količina sušenog povrća za provedbu potrebnih analiza. Shematski prikaz provođenja ovog dijela eksperimentalnog rada prikazan je na *slici 3.5*.



**Slika 3.5** Prikaz provođenja pokusa sa svrhom određivanja svojstava kvalitete povrća

### 3.3.9. Određivanje boje

Objektivno mjerenje boje svježih, sušenih i rehidratiranih uzoraka provedeno je pomoću kromametra Chroma Meter CR 400 (Konica Minolta, Japan) korištenjem  $CIA-L^*a^*b^*$  mjernog sistema za boje.

#### *Princip metode*

Metoda se temelji na mjerenju reflektirane svjetlost s površine osvijetljenog predmeta. Predmet kojemu se mjeri boja postavlja se na otvor ( $\phi = 8$  mm) mjerne glave uređaja, kroz koji pulsirajuća ksenonska lampa baca difuzno svjetlo okomito na površinu uzorka. Dio svjetlosti reflektirane svjetlosti s površine uzorka mjeri se sa šest osjetljivih silikonskih fotoćelija.



Neposredno prije svakog mjerenja instrument je baždaren pomoću standardne bijele keramičke pločice (CR-A43).

***Provedba postupka određivanja boje povrća***

*Boja svježih i rehidratiranih uzoraka* (dimenzija (15x15x5) mm) mjerena je uvijek na sredini, na obje strane (s većom površinom) uzorka, i to na ukupno deset reprezentativnih uzoraka za svaki eksperimentalni set te je bilježena najmanja, najveća i srednja vrijednost  $L^*$ ,  $a^*$  i  $b^*$  parametra te standardna devijacija vrijednosti svih mjerenja.

*Boja sušenih uzoraka* određivana ja na prethodno samljevenom sušenom povrću korištenjem dodatka-komorice za mjerenje boje praškastih materijala (CR-A50). Usitnjavanje sušenih uzoraka provedeno je radi promjena dimenzija i površine uzoraka (skupljanje i deformiranje) nastalih tijekom sušenja pri čemu nije bilo moguće provesti objektivno mjerenje stvarne boje površine uzoraka. Kako bi se mogla odrediti promjena boje koja je nastala kao posljedica sušenja, boja usitnjenih sušenih uzoraka uspoređivana je s bojom svježih, također usitnjenih (kaša) uzoraka, koja je određivana korištenjem istog dodatka-komorice za praškaste materijale. Mjerenje boje svake šarže uzorka provedena je u deset mjerenja uz bilježenje najmanjih, najvećih i srednjih vrijednosti  $L^*$ ,  $a^*$  i  $b^*$  parametra boje te standardna devijacija vrijednosti svih paralelnih mjerenja.

Prema izmjerenim vrijednostima boje izračunati su i ostali parametri boje svježih, sušenih i rehidratiranih uzoraka, kako slijedi:

- $C^*$  (*chroma*, kromatičnoat) - prema izrazu (2.44),
- $h^*$  (*hue angle*, ton boje) - prema izrazu (2.43),
- $BI$  (indeks posmeđivanja) – prema izrazu (2.45),

a također su izračunate (određene) i vrijednosti koje ukazuju na promjenu boje sušenih i rehidratiranih uzoraka u odnosu na boju svježih uzoraka povrća, i to:

- $\Delta E_{ab}$  (ukupnu promjenu boje):

$$\Delta E_{ab} = \sqrt{(L_o^* - L^*)^2 + (a_o^* - a^*)^2 + (b_o^* - b^*)^2}, \quad (3.29)$$

- $\Delta C^*$  (promjena kromatičnosti) [106] kao:

$$\Delta C^* = \sqrt{(a_o^* - a^*)^2 + (b_o^* - b^*)^2}, \quad (3.30)$$

- $\Delta h^*$  (promjena tona boje) [133]:

$$\Delta h^* = \sqrt{(\Delta E_{ab})^2 - (L_o^* - L^*)^2 - (\Delta C^*)^2} \quad (3.31)$$

gdje indeks (o) označava parametre svježeg uzorka.

Procjena utjecaja temperature i načina sušenja na promjenu boje uzoraka nastalih nakon sušenja i rehidracije provedena je statističkom obradom dobivenih podataka korištenjem analize varijabilnosti (ANOVA) prema dvofaktorijalnom pokusu s 2x4 kombinacija i shemi slučajnog bloknog rasporeda [134].

### 3.3.10. Određivanje volumena

Volumen svježim, sušenim i rehidratiranim uzorcima povrća određivan je tzv. *liquid-displacement* metodom, odnosno uranjanjem čvrstog materijala (uzorka) u kapljevину poznate gustoće.

#### *Princip metode*

*Liquid-displacement* metoda je metoda direktnog mjerenjem promjene volumena kapljevine nakon potapanja uzorka. Razlika između početnog volumena kapljevine u mjernom (graduiranom) cilindru i volumena kapljevine zajedno s uronjenim materijalom predstavlja volumen samog materijala [135].

#### *Provedba određivanja volumena*

Kao test-kapljevina korišteno je motorno ulje, kojemu je u graduiranom cilindru određivan volumen prije i nakon uronjavanja uzorka materijala, a razlika između izmjerenih vrijednosti uzimana je kao volumen uronjenog materijala izražen u mililitrima.

### 3.3.11. Određivanje teksturalnih svojstava

Svježi i rehidratirani uzorci mrkve i krumpira analizirani su korištenjem univerzalnog uređaja za analizu teksturalnih svojstava TAXT2 Texture Analyzer (Stable Miceo System, U.K.) s mjernom glavom od 5 kg, uz primjenu testa jednosmjerne kompresije.

#### *Princip metode*

Test jednosmjerna (nedestruktivna) kompresija podrazumijeva kompresiju okomito na jednu os uzorka pri čemu se mjeri maksimalna i srednja sila potrebna za kompresiju uzorka do određenog stupnja.

#### *Provedba testa kompresije*

Test kompresije provoden je primjenom P/10 nastavak (ravna ploča kružnog presjeka) promjera 10 cm, uz brzinu kompresije od 0,2 mm/s i 15%-tnu kompresiju uzorka pri čemu je dodirna površina mjernog nastavka i uzorka iznosila  $2,55 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$ .

Testirano je po 10 reprezentativnih uzoraka svježeg i rehidratiranog povrća iz svakog eksperimentalnog seta pri čemu su bilježene krivulje ovisnosti sile o vremenu, te maksimalne i srednje sile potrebne za 15%-tnu kompresiju svakog uzorka.

### 3.3.12. Određivanje sadržaja ukupnih fenolnih tvari i njihove antioksidacijske aktivnosti

Određivanje sadržaja fenolnih tvari uzorcima povrća uključivalo je ekstrakciju ukupnih fenolnih tvari iz uzoraka mrkve i krumpira, a potom se je u dobivenim ekstraktima odredio sadržaj ukupnih fenolnih tvari i njihova antioksidacijska sposobnost.

#### 3.3.12.1. Ekstrakcija ukupnih fenolnih tvari

Ekstrakcija fenolnih tvari iz svježih i sušenih uzoraka mrkve i krumpira provedena je sa zakiseljenom vodenom otopinom metanola kako bi se iz povrća ekstrahirale ukupne fenolne tvari (u slobodnoj i vezanoj formi).

##### *Priprema uzoraka*

*Svježi uzorci* povrća prethodno su usitnjeni, a potom evaporirani s ciljem smanjenja udjela vode što je omogućilo potpuniju izolaciju fenolnih tvari [124].

*Uvjeti evaporacije* (Rotavapor R-210, Büchi, Švicarska):

- temperatura vodene kupelji: 50 °C
- temperatura ključanja: 30 °C
- tlak: 42 mbar
- temperatura rashladne vode: 10 °C

Nakon evaporacije, uzorci su samljeveni u prah u mlinu (Gorenje, Slovenija). Mljevenje je vršeno u vremenskim intervalima od po 20 sekundi kako bi se izbjeglo prekomjerno zagrijavanje uzoraka. Samljevenim, evaporiranim svježim uzorcima povrća određen je sadržaj suhe tvari.

*Sušeni uzorci* povrća prethodno su samljeveni na isti način.

##### *Provedba ekstrakcije*

Ekstrakcija ukupnih (slobodnih i konjugiranih) fenolnih tvari provedena je prema nešto modificiranoj proceduri koju su koristili Stratil i suradnici [124]. Ukratko: 0,5 g prethodno pripremljenog uzorka ekstrahirano je s 10 cm<sup>3</sup> zakiseljene vodene otopine metanola (1:1, v/v; 2,4 mol/dm<sup>3</sup> HCl). Ekstrakcija je provođena u zatvorenim plastičnim epruvetama u vodenoj kupelji pri 82-83 °C (vrelšte otapala) u ukupnom trajanju od 150 minuta, uz vorteksiranje

(Vibromix, Tehtnica, Slovenija) uzoraka u trajanju od 20 sekundi nakon svakih 30 minuta ekstrakcije. Nakon ekstrakcije u ohlađene ekstrakte dodavano je po 10 cm<sup>3</sup> vodene otopine metanola (1:1 v/v) nakon čega su ponovo vorteksirani, centrifugirani pri 10000g tijekom 10 min i profiltrirani. Na taj način dobiveni su bistri, stabilni ekstrakti povrća koji su čuvani su na + 4 °C do provođenja analiza.

Za svaki uzorak povrća napravljena su po dva istovjetna ekstrakcijska postupka.

### 3.3.12.2. Određivanja sadržaja ukupnih fenolnih tvari u ekstraktima

Ukupne fenolne tvari u ekstraktima svježeg i sušenog povrća određene su kvantitativnom spektrofotometrijskom metodom korištenjem Folin-Ciocalteu reagensa uz galnu kiselinu kao standard.

#### *Princip metode*

Metoda se temelji na redukciji fosfowolframat-fosfomolibdat kompleksa žute boje (Folin-Ciocalteu reagens) u lužnatoj sredini u prisutnosti fenolnih tvari pri čemu dolazi do stvaranja modro obojenih reakcijskih produkata. Nastajanje plavo obojenih produkata između fenolnih spojeva i Folin-Ciocalteu reagensa neovisno je o strukturi prisutnih fenolnih spojeva. Ova metoda je prikladna, jednostavna i reproducibilna, te je postala rutinska analiza u proučavanju fenolnih antioksidanata [124, 136].

#### *Provedba određivanja ukupnih fenolnih tvari u ekstraktima*

Folin-Ciocalteuova mikro-metoda [137], korištena za određivanje ukupnih polifenola u vinu i čaju, modificirana je udvostručenjem ukupnog volumena reakcijske otopine. Ukratko: u epruvetu s 40 μl priređenog ekstrakta povrća dodano je 3,16 cm<sup>3</sup> destilirane vode i 200 μl Folin-Ciocalteu reagensa te dobro promiješano, nakon 30 sekundi - 8 mininuta u epruvetu je dodano 600 μl 20%-tne otopine Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, potom je sadržaj epruvete (ukupno 4 cm<sup>3</sup>) vortexiran te inkubiran u vodenoj kupelji na 40 °C tijekom 30 minuta. Apsorbancija priređene otopine očitana je na spektrofotometru (UV-1700 Spectrophotometer, Shimadzu, Japan) pri 765 nm nasuprot slijepoj probi (umjesto ekstrakta sadržavala je 40 μl destilirane vode) korištenjem kvarcnih kiveta.

Na isti način određene su i apsorbancije otopina galne kiseline različitih koncentracija (0,05-1,0 g/dm<sup>3</sup>) što je korišteno za izradu krivulje standarda i određivanje regresijske jednadžbe ovisnosti apsorbancije o koncentraciji galne kiseline. Prema navedenoj ovisnosti, izračunate su koncentracije ukupnih fenolnih tvari prisutnih u ekstraktima povrća, koje su izražene kao ekvivalent galne kiseline (GAE) na suhu tvar uzorka [ $\text{g}_{\text{GAE}}/\text{g}_{\text{st}}$ ].

Određivanje sadržaja ukupnih fenolnih tvari provedeno je u tri paralelna ponavljanja za svaki dobiveni ekstrakt povrća, te su rezultati prikazani kao srednja vrijednost izračunatih koncentracija.

### 3.3.12.3. Određivanje antioksidacijske aktivnosti ekstrakata

Antioksidacijska aktivnost ekstrakata svježeg i sušenog povrća određena je statičnom metodom DPPH•-testa.

#### *Princip metode*

Metoda se temelji na sposobnosti fenolnog antioksidanta (PheOH) da donira vodik sintetičkom DPPH• radikalu (1,1-difenil-2-pikrilhidrazil radikal) kako slijedi [116]:



gdje su (I), (II), (III)... rezonantne strukture. Prestala koncentracija DPPH• radikala ovisi isključivo o koncentraciji i strukturi fenolnih spojeva.

DPPH• je jedan od svega nekoliko stabilnih komercijalnih organskih radikala s dušikom (na kome je smješten slobodni radikal), a koji ima UV-VIS apsorbancijski maksimum pri 515 nm. Obzirom da se njegova intenzivna plavo-ljubičasta (slobodni radikal) boja mijenja do žute (reducirani oblik), odvijanje reakcije prati se spektrofotometrijski [136].

DPPH•-test je jedan od najstarijih i najčešće korištenih metoda za određivanje ukupne antioksidacijske aktivnosti [124].

#### *Provedba određivanja antioksidacijske aktivnosti*

Postupak određivanja antioksidacijske aktivnosti ekstrakata povrća provedena je prema metodi autora Brand-Williams, Cuvelier i Berset (1995) opisanoj u znanstvenim radovima drugih autora [116, 136]. Ukratko: alikvot od 0,1 cm<sup>3</sup> svakog priređenog ekstrakta dodan je u epruvetu s 3,9 cm<sup>3</sup> otopine DPPH u metanolu (0,025g/dm<sup>3</sup>), te je priređeno jednako razrjeđenje početne otopine DPPH• (0,1 cm<sup>3</sup> metanola + 3,9 cm<sup>3</sup> metanolna otopina DPPH• (0,025g/dm<sup>3</sup>)). Reakcijske otopine su ostavljane u mraku na sobnoj temperaturi te su im, po isteku 30 minuta, očitane apsorbancije na spektrofotometru (UV-1700 Spectrophotometer, Shimadzu, Japan) pri 515 nm nasuprot slijepim probama (slijepa proba za uzorke: 0,1 cm<sup>3</sup> ekstrakta + 3,9 cm<sup>3</sup> metanola; slijepa proba za DPPH•: 4 cm<sup>3</sup> metanola).

Antioksidacijska aktivnost [138] ekstrakata izračunata je i izražena kao:

$$\rightarrow \% \text{DPPH}^\bullet_{\text{inh.}} = \left[ 1 - \frac{Abs_{\text{uzorka}}}{Abs_{\text{DPPH}^\bullet}} \right] \cdot 100, \quad (3.32)$$

gdje je ( $\%DPPH_{inh.}^{\bullet}$ ) postotak inhibiranog  $DPPH^{\bullet}$ , ( $Abs_{uzorka}$ ) apsorbancija uzorka, a ( $Abs_{DPPH^{\bullet}}$ ) apsorbancija  $DPPH^{\bullet}$ ; te kao:

$$\rightarrow AA = \frac{m_{DPPH_{inh.}^{\bullet}}}{m_{st}} \left[ \frac{g_{DPPH}}{g_{st}} \right] \quad (3.33)$$

gdje je: (AA) antioksidacijska aktivnost uzorka, tj. masa  $DPPH^{\bullet}$  koju inhibira 1 g suhe tvari uzorka.

Određivanje antioksidacijske aktivnosti provedeno je u tri paralelna ponavljanja za svaki dobiveni ekstrakt povrća, a izračunate vrijednosti prikazane su kao srednja vrijednost dobivenih paralelnih određivanja.

## **4.    **REZULTATI****

U ovom poglavlju dan je pregled rezultata dobivenih eksperimentalnim radom kao i prikaz rezultata njihove obrade. Prikazani su rezultati konvekcijskog sušenja u fluidiziranom sloju i infracrvenog sušenja uzoraka krumpira i mrkve, te rezultati rehidracije (istih) sušenih uzoraka.

Eksperimentalne/mjerene vrijednosti mase uzoraka tijekom sušenja i rehidracije prevedene su u bezdimenzionalnu vlažnost uzoraka što je poslužilo za izradu krivulja sušenja/rehidracije te modeliranje kinetike sušenja/rehidracije pomoću odabranih matematičkih modela. Procijenjeni parametri matematičkih modela korišteni su za određivanje efektivnog difuzijskog koeficijenta za procese sušenja i rehidracije te za određivanje vremena sušenja potrebnog za sušenje povrća do određene vlažnosti. Prema tim rezultatima (vremenima) provedeni su istovjetni procesi sušenja i rehidracije novih uzoraka krumpira i mrkve te su oni korišteni za procjenu utjecaja načina sušenja i temperature sušenja na promjenu nekih svojstava kvalitete sušenih/rehidratiranih materijala u odnosu na svježi materijal.

Rezultati su podijeljeni u tri osnovne skupine na: rezultate sušenja, rezultate rehidracije i rezultate procjene promjena nekih svojstava povrća uzrokovane sušenjem/rehidracijom. U svakom poglavlju prvo je dan prikaza eksperimentalnih rezultata, a potom i rezultata njihove obrade (grafičke/statističke/numeričke).

#### **4.1. Sušenje**

U ovom dijelu izdvojeno su prikazani rezultati sušenja krumpira i rezultati sušenja mrkve. Za svaki prehrambeni materijal prvo su prikazani rezultati konvekcijskog sušenja u fluidiziranom sloju, a potom i radijacijskog – infracrvenog sušenja, na način da iza eksperimentalnih krivulja sušenja slijede i rezultati aproksimacije eksperimentalnih podataka odabranim matematičkim modelima. U posebnim podpoglavljima razmatrani su utjecaji načina sušenja i temperature sušenja na procijenjene parametre modela te vrijednosti koeficijenta efektivne difuzije vlage.

Rezultati su prikazani kako slijedi:

- sušenje krumpira [K]

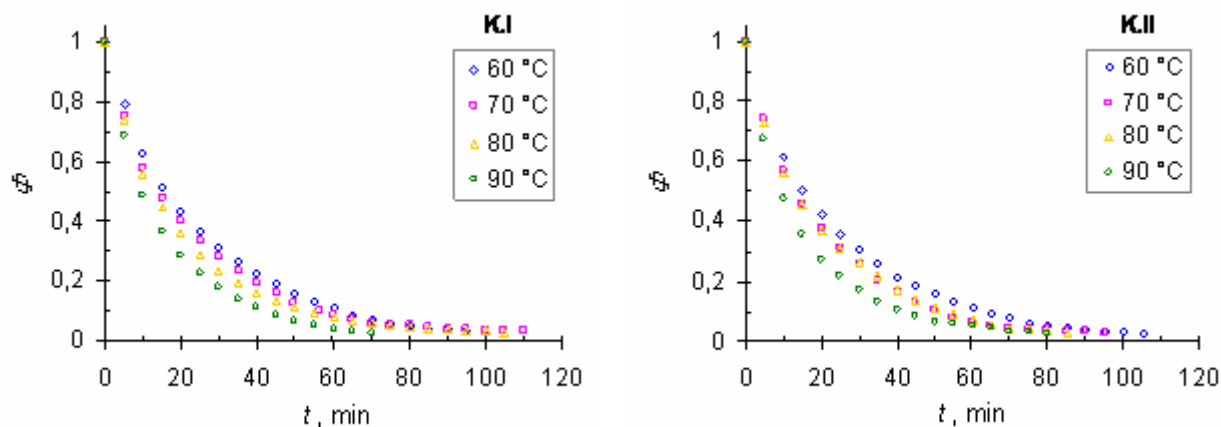


- konvekcijsko sušenje u fluidiziranom sloju [FB]
- infracrveno sušenje [IR]
- sušenje mrkve [M]
  - konvekcijsko sušenje u fluidiziranom sloju [FB]
  - infracrveno sušenje [IR]
- utjecaj načina sušenja i temperature sušenja na procijenjene parametre modela
- efektivni difuzijski koeficijent vlage tijekom sušenja
- Biotov broj i koeficijent prijenosa mase kod sušenja

#### 4.1.1. Sušenje krumpira

##### 4.1.1.1. Konvekcijsko sušenje krumpira u fluidiziranom sloju [FB\_K]

###### *Eksperimentalni rezultati sušenja*



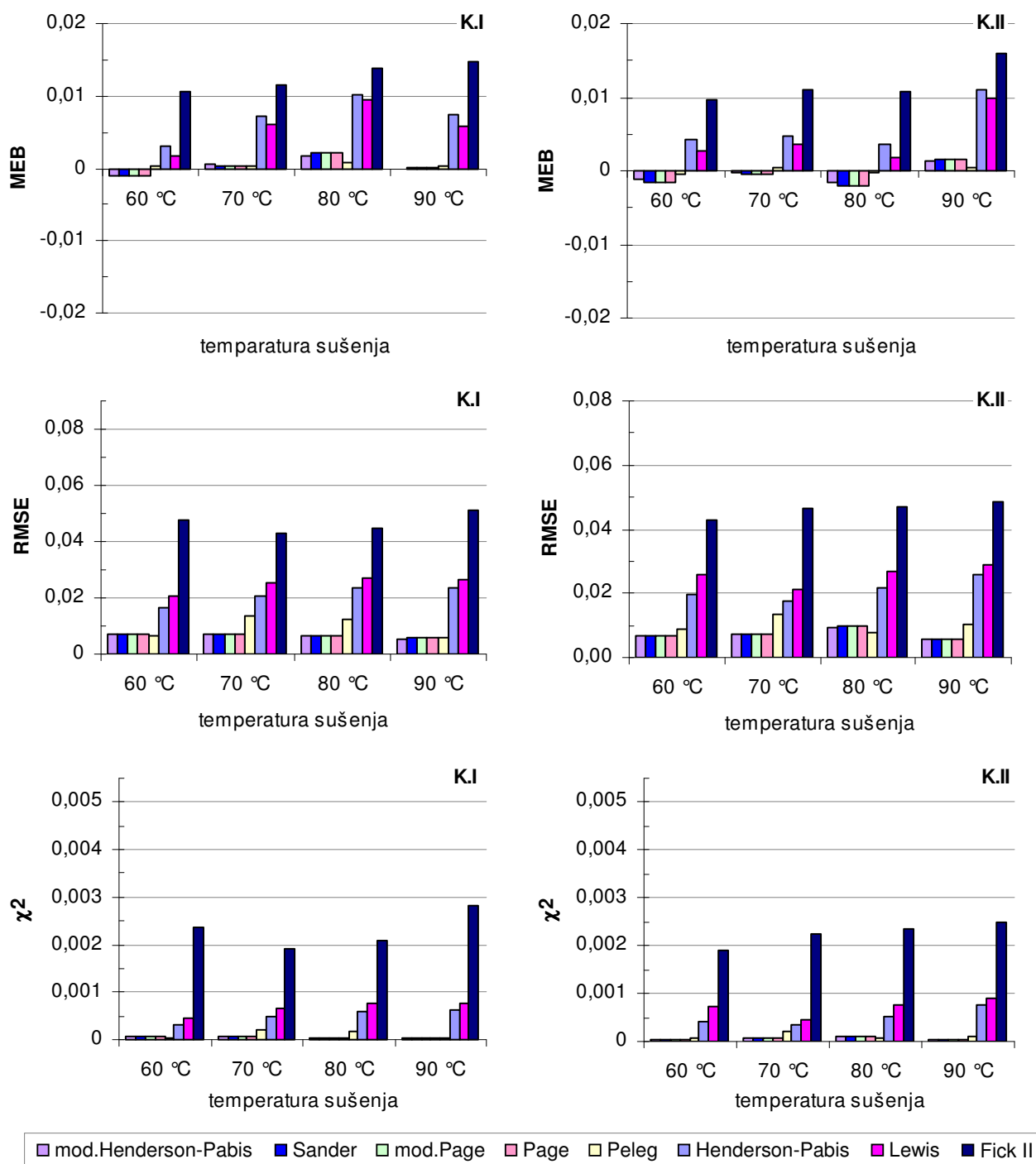
**Slika 4.1** Eksperimentalni rezultati konvekcijskog sušenja krumpira u fluidiziranom sloju (uzorci [K.I, K.II]) za različite temperature sušenja (ovisnost bezdimenzionalne vlažnosti [ $\Phi$ ] o vremenu sušenja [ $t$ ])

Regresijskom analizom prikazanih eksperimentalnih rezultata procijenjeni su parametri kinetičkih matematičkih modela (*Tablica 4.1*), a slaganje eksperimentalnih i (prema modelima) izračunatih vrijednosti određeno je pomoću statističkih parametara (*Slike 4.2, 4.3*).

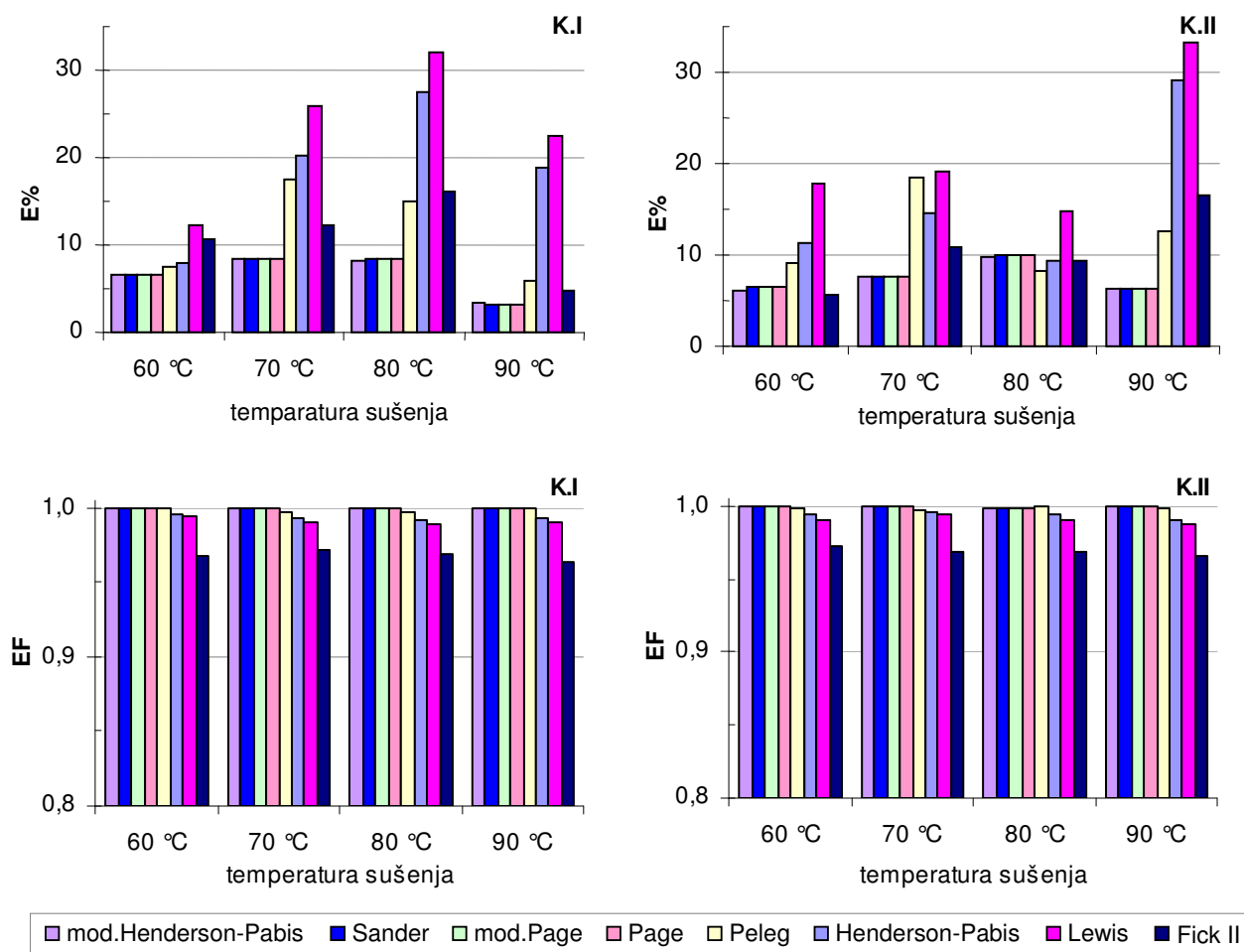
*Rezultati primjene matematičkih modela***Tablica 4.1** Procijenjeni parametri matematičkih modela te koeficijenti korelacije (R) i ukupno kvadratno odstupanje (FL) između eksperimentalnih i izračunatih vrijednosti za konvekcijsko sušenje krumpira u fluidiziranom sloju (uzorci K.I i K.II)

temperatura sušenja	uzorak: K.I				uzorak: K.II			
	60 °C	70 °C	80 °C	90 °C	60 °C	70 °C	80 °C	90 °C
parametar $K_F, \text{min}^{-1}$	<b>Fick</b>							
R	0,0318	0,0353	0,0393	0,0500	0,0325	0,0387	0,0384	0,0514
FL	0,9836	0,9856	0,9843	0,9818	0,9861	0,9844	0,9840	0,9825
	0,0476	0,0424	0,0437	0,0395	0,0402	0,0429	0,0401	0,0400
parametar $K_L, \text{min}^{-1}$	<b>Lewis</b>							
R	0,0394	0,0438	0,0490	0,0621	0,0404	0,0479	0,0476	0,0640
FL	0,9969	0,9950	0,9943	0,9952	0,9949	0,9968	0,9950	0,9937
	0,0090	0,0149	0,0159	0,0105	0,0149	0,0088	0,0127	0,0144
parametri $k, \text{min}^{-n}$	<b>Page</b>							
$n$	0,0600	0,0757	0,0874	0,1032	0,0697	0,0735	0,0791	0,1154
R	0,8785	0,8377	0,8217	0,8317	0,8418	0,8694	0,8454	0,8029
FL	0,9997	0,9996	0,9997	0,9998	0,9996	0,9996	0,9993	0,9998
	0,0010	0,0012	0,0010	0,0005	0,0010	0,0011	0,0016	0,0006
parametri $t_k, \text{min}$	<b>Sander</b>							
$n$	24,58	21,78	19,42	15,35	23,65	20,13	20,09	14,73
R	0,8785	0,8377	0,8217	0,8317	0,8418	0,8694	0,8454	0,8029
FL	0,9997	0,9996	0,9997	0,9998	0,9996	0,9996	0,9993	0,9998
	0,0010	0,0012	0,0010	0,0005	0,0010	0,0011	0,0016	0,0006
parametri $k', \text{min}^{-1}$	<b>modificirani Page</b>							
$n'$	0,0407	0,0459	0,0515	0,0652	0,0423	0,0497	0,0498	0,0679
R	0,8785	0,8377	0,8217	0,8317	0,8418	0,8694	0,8454	0,8029
FL	0,9997	0,9996	0,9997	0,9998	0,9996	0,9996	0,9993	0,9998
	0,0010	0,0012	0,0010	0,0005	0,0010	0,0011	0,0016	0,0006
parametri $K_1, \text{min}$	<b>Peleg</b>							
$K_2$	18,4492	15,1876	13,1568	10,8942	17,1923	14,5312	14,8089	9,9305
R	0,8278	0,8674	0,8819	0,8602	0,8478	0,8485	0,8405	0,8863
FL	0,9997	0,9985	0,9988	0,9998	0,9994	0,9987	0,9996	0,9993
	0,0008	0,0043	0,0035	0,0005	0,0016	0,0035	0,0011	0,0017
parametri $G$	<b>Henderson-Pabis</b>							
$S, \text{min}^{-1}$	0,9578	0,9454	0,9496	0,9584	0,9397	0,9580	0,9472	0,9533
R	0,0377	0,0413	0,0463	0,0594	0,0378	0,0458	0,0449	0,0608
FL	0,9980	0,9967	0,9957	0,9963	0,9971	0,9978	0,9967	0,9950
	0,0058	0,0099	0,0120	0,0082	0,0084	0,0060	0,0083	0,0115
parametri $G'$	<b>modificirani Henderson-Pabis</b>							
$S', \text{min}^{-N}$	0,9987	0,9992	1,0059	1,0019	0,9921	0,9977	0,9945	1,0035
$N$	0,0597	0,0755	0,0892	0,1038	0,0675	0,0728	0,0774	0,1166
R	0,8797	0,8384	0,8170	0,8302	0,8492	0,8716	0,8505	0,8003
FL	0,9997	0,9996	0,9997	0,9998	0,9997	0,9996	0,9994	0,9998
	0,0010	0,0012	0,0009	0,0005	0,0010	0,0011	0,0016	0,0005

*Statistički pokazatelji uspješnosti aproksimacije*

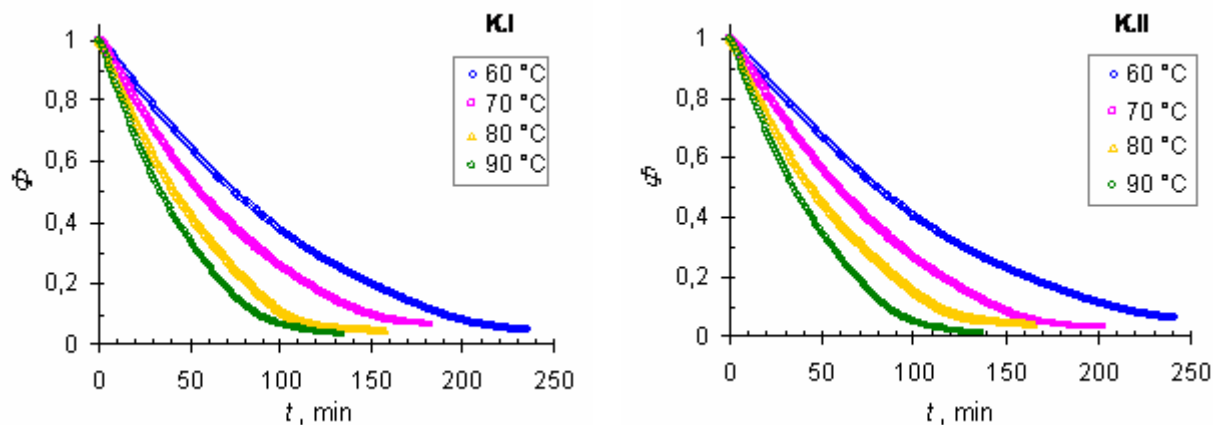


**Slika 4.2** Srednje apsolutno odstupanje [MEB], srednje odstupanje [RMSE] i reducirani chi-kvadrat [ $\chi^2$ ] aproksimacije eksperimentalnih podataka sušenja krumpira u fluidiziranom sloju (uzorci [K.I, K.II]) s odabranim modelima za različite temperature sušenja



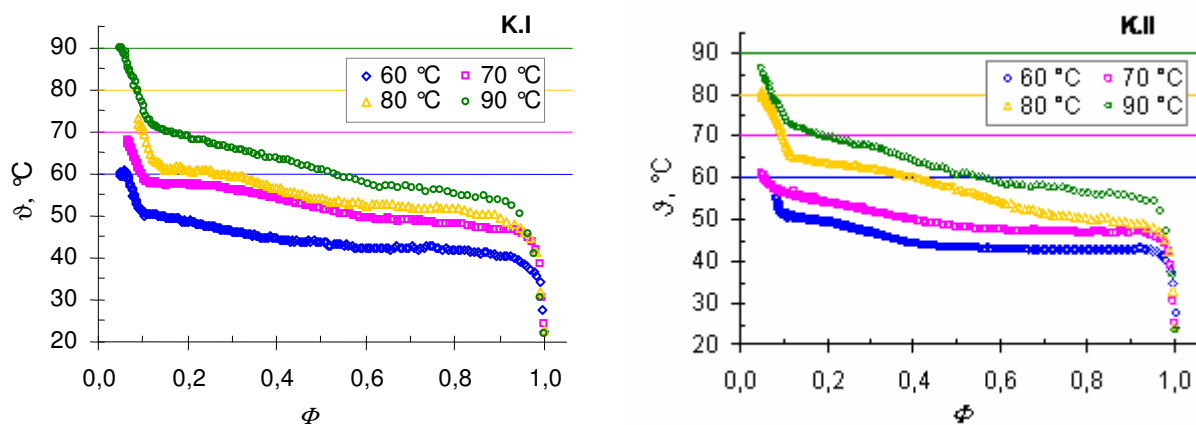
**Slika 4.3** Srednja relativna pogreška [E%] i efikasnost odabranih modela [EF] u predviđanju kinetike sušenja krumpira u fluidiziranom sloju (uzorci [K.I, K.II]) za različite temperature sušenja

## 4.1.1.2. Infracrveno sušenje krumpira [IR\_K]

*Eksperimentalni rezultati sušenja*

**Slika 4.4** Eksperimentalni podaci infracrvenog sušenja krumpira (uzorci [K.I, K.II]) za različite temperature sušenja (ovisnost bezdimenzionalne vlažnosti materijala [ $\Phi$ ] o vremenu sušenja [ $t$ ])

Regresijskom analizom prikazanih eksperimentalnih rezultata procijenjeni su parametri kinetičkih matematičkih modela (*Tablica 4.2*), a slaganje eksperimentalnih i (prema modelima) izračunatih vrijednosti određeno je pomoću statističkih parametara (*Slike 4.6-7*).

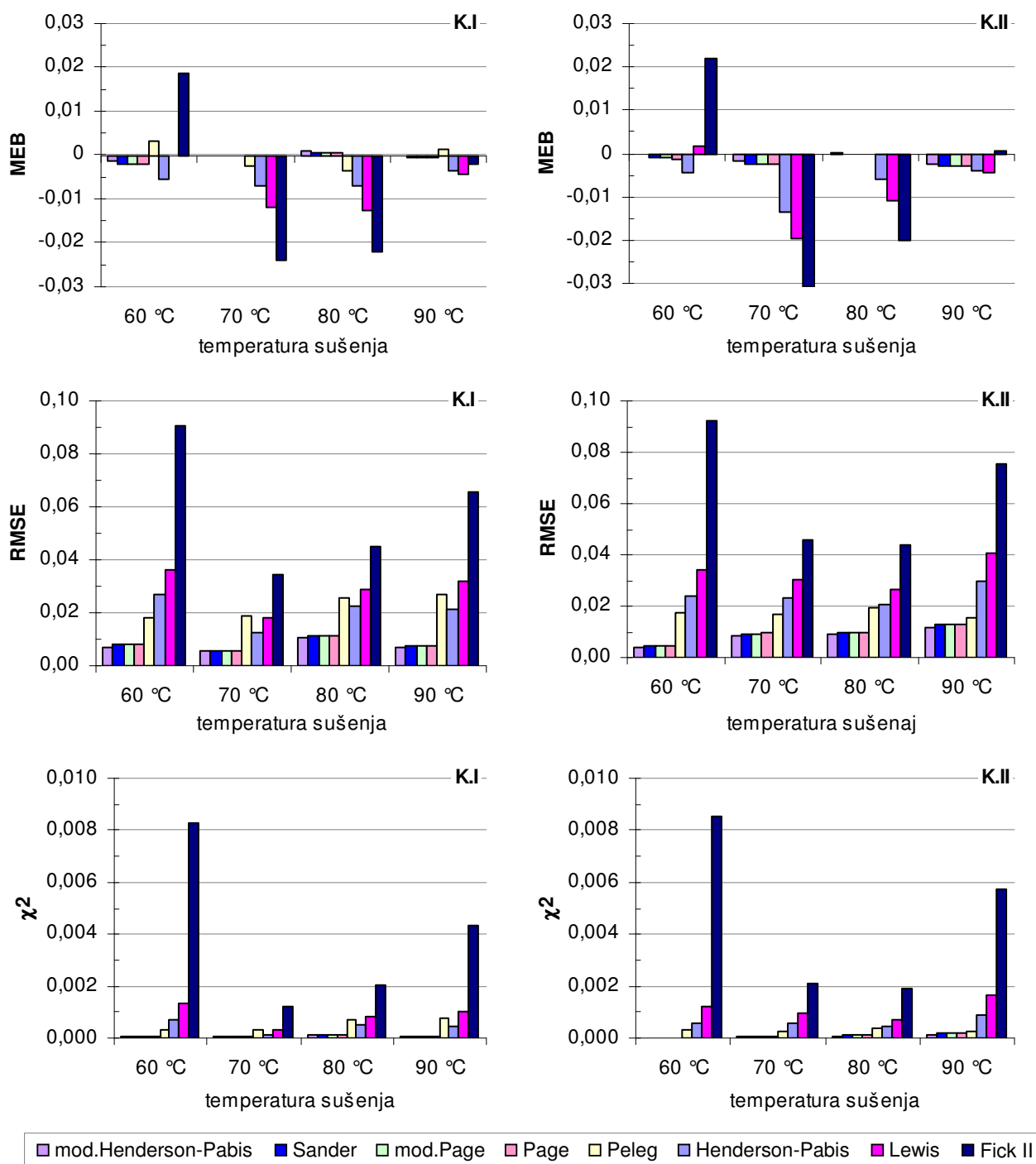


**Slika 4.5** Ovisnost temperature materijala [ $\theta$ ] o bezdimenzionalnoj vlažnosti materijala [ $\Phi$ ] za infracrveno sušenje krumpira [K.I, K.II] pri različitim temperaturama sušenja

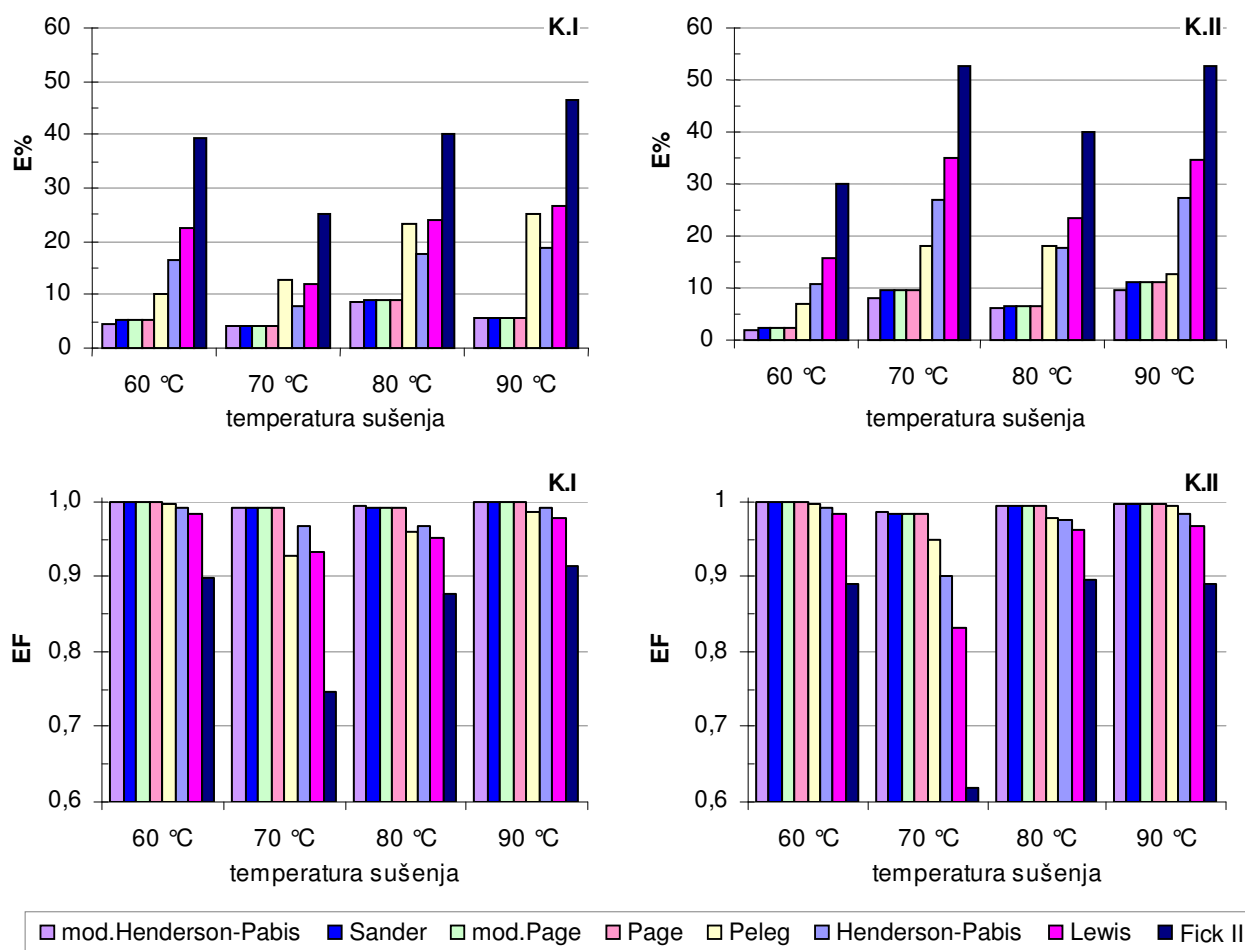
*Rezultati primjene matematičkih modela***Tablica 4.2** Procijenjeni parametri matematičkih modela te koeficijenti korelacije (R) i ukupno kvadratno odstupanje (FL) između eksperimentalnih i izračunatih vrijednosti za infracrveno sušenje krumpira (uzorci K.I i K.II)

temperatura sušenja	uzorak: K.I				uzorak: K.II			
	60 °C	70 °C	80 °C	90 °C	60 °C	70 °C	80 °C	90 °C
parametar $K_F, \text{min}^{-1}$	<b>Fick</b>							
R	0,0082	0,0108	0,0149	0,0183	0,0074	0,0107	0,0139	0,0178
FL	0,9476	0,9567	0,9535	0,9558	0,9442	0,9475	0,9553	0,9441
parametar $K_L, \text{min}^{-1}$	<b>Lewis</b>							
R	0,0102	0,0133	0,0183	0,0224	0,0093	0,0132	0,0170	0,0221
FL	0,9918	0,9955	0,9921	0,9932	0,9925	0,9898	0,9935	0,9893
parametri $k, \text{min}^{-n}$	<b>Page</b>							
$n$	0,0034	0,0063	0,0070	0,0092	0,0032	0,0039	0,0072	0,0076
R	1,2360	1,2310	1,2324	1,2229	1,2255	1,2708	1,2042	1,2731
FL	0,9996	0,9998	0,9991	0,9997	0,9999	0,9992	0,9993	0,9989
parametri $t_k, \text{min}$	<b>Sander</b>							
$n$	100,01	76,32	56,12	46,05	108,33	78,06	60,19	46,38
R	1,2361	1,1699	1,2329	1,2231	1,2260	1,2710	1,2046	1,2733
FL	0,9996	0,9998	0,9991	0,9997	0,9999	0,9992	0,9993	0,9989
parametri $k', \text{min}^{-1}$	<b>modificirani Page</b>							
$n'$	0,0100	0,0131	0,0178	0,0217	0,0092	0,0128	0,0166	0,0216
R	1,2361	1,1699	1,2329	1,2231	1,2260	1,2710	1,2046	1,2733
FL	0,9996	0,9998	0,9991	0,9997	0,9999	0,9992	0,9993	0,9989
parametri $K_1, \text{min}$	<b>Peleg</b>							
$K_2$	107,8599	74,9206	55,9322	45,0912	118,8127	83,6561	60,3448	51,5334
R	0,5524	0,6350	0,6226	0,6378	0,5335	0,5606	0,6185	0,5261
FL	0,9980	0,9964	0,9946	0,9951	0,9980	0,9972	0,9966	0,9982
parametri $G$	<b>Henderson-Pabis</b>							
$S, \text{min}^{-1}$	1,0775	1,0664	1,0807	1,0802	1,0772	1,0902	1,0727	1,0877
R	0,0110	0,0143	0,0198	0,0241	0,0101	0,0144	0,0183	0,0241
FL	0,9956	0,9980	0,9955	0,9965	0,9964	0,9942	0,9964	0,9938
parametri $G'$	<b>modificirani Henderson-Pabis</b>							
$S', \text{min}^{-N}$	0,9791	0,9988	0,9823	0,9880	0,9897	0,9764	0,9842	0,9780
$N$	0,0027	0,0062	0,0059	0,0083	0,0029	0,0031	0,0062	0,0061
R	1,2762	1,1717	1,2677	1,2456	1,2470	1,3201	1,2342	1,3197
FL	0,9997	0,9998	0,9992	0,9997	0,9999	0,9994	0,9994	0,9991
	0,0115	0,0079	0,0205	0,0067	0,0042	0,0220	0,0169	0,0174

*Statistički pokazatelji uspješnosti aproksimacije*



**Slika 4.6** Prosječno apsolutno odstupanje [MEB], srednje odstupanje [RMSE] i reducirani chi-kvadrat [ $\chi^2$ ] aproksimacije eksperimentalnih podataka infracrvenog sušenja krumpira (uzorci [K.I, K.II]) s odabranim modelima za različite temperature sušenja

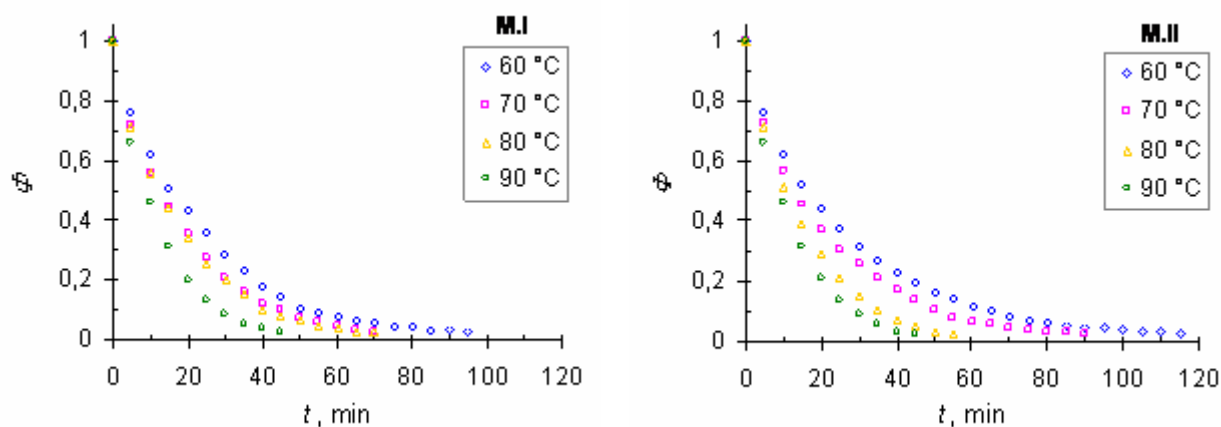


**Slika 4.7** Srednja relativna pogreška [E%] i efikasnost odabranih modela [EF] u predviđanju kinetike infracrvenog sušenja krumpira (uzorci [K.I, K.II]) za različite temperature sušenja



## 4.1.2. Sušenje mrkve

## 4.1.2.1. Konvekcijsko sušenje mrkve u fluidiziranom sloju [FB\_M]

*Eksperimentalni rezultati sušenja*

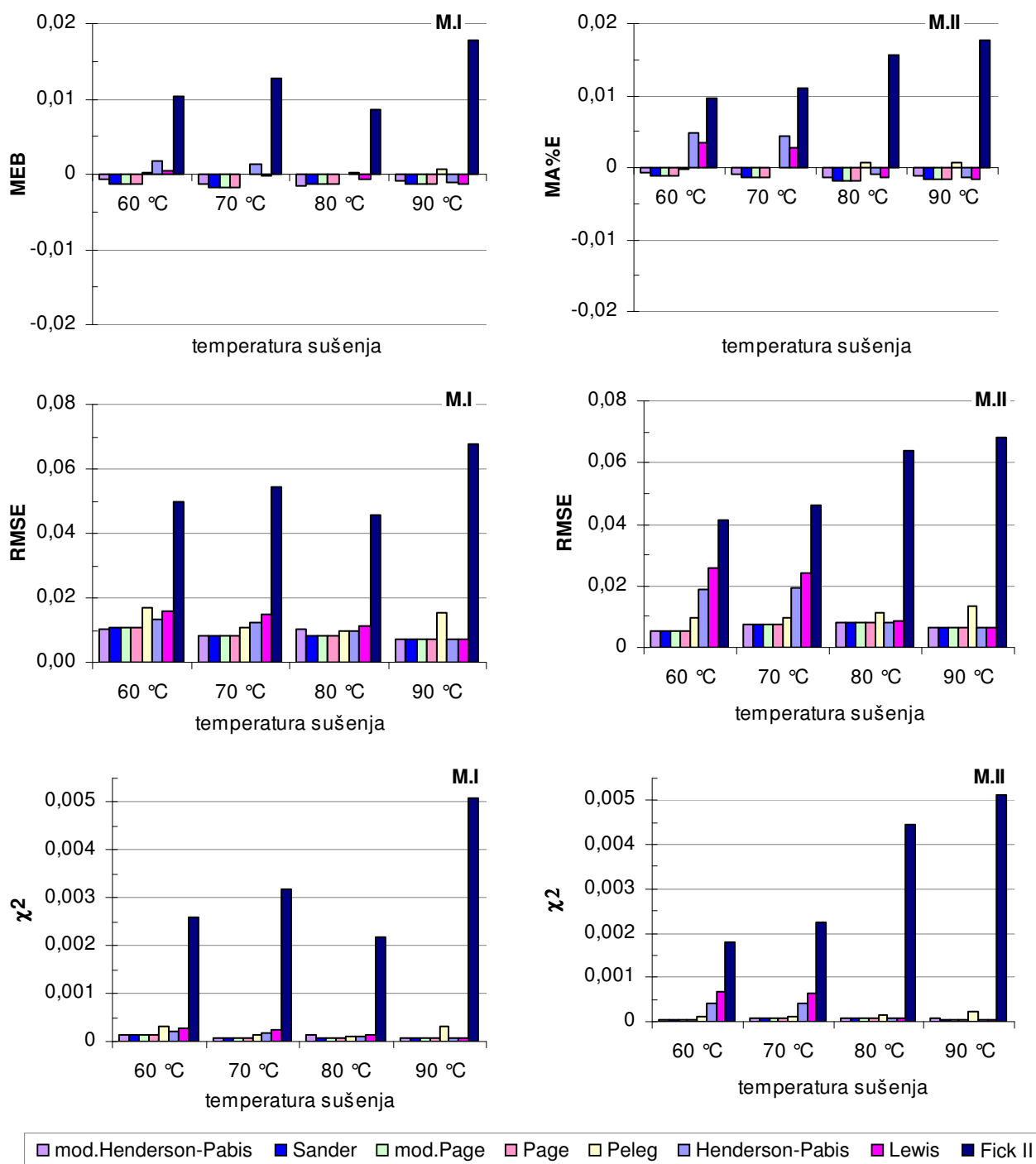
**Slika 4.8** Eksperimentalni podaci konvekcijskog sušenja mrkve u fluidiziranom sloju (uzorci [M.I, M.II]) za različite temperature sušenja (ovisnost bezdimenzionalne vlažnosti [ $\Phi$ ] o vremenu sušenja [ $t$ ])

Regresijskom analizom prikazanih eksperimentalnih rezultata procijenjeni su parametri kinetičkih matematičkih modela (*Tablica 4.3*), a slaganje eksperimentalnih i (prema modelima) izračunatih vrijednosti određeno je pomoću statističkih parametara (*Slike 4.9-10*).

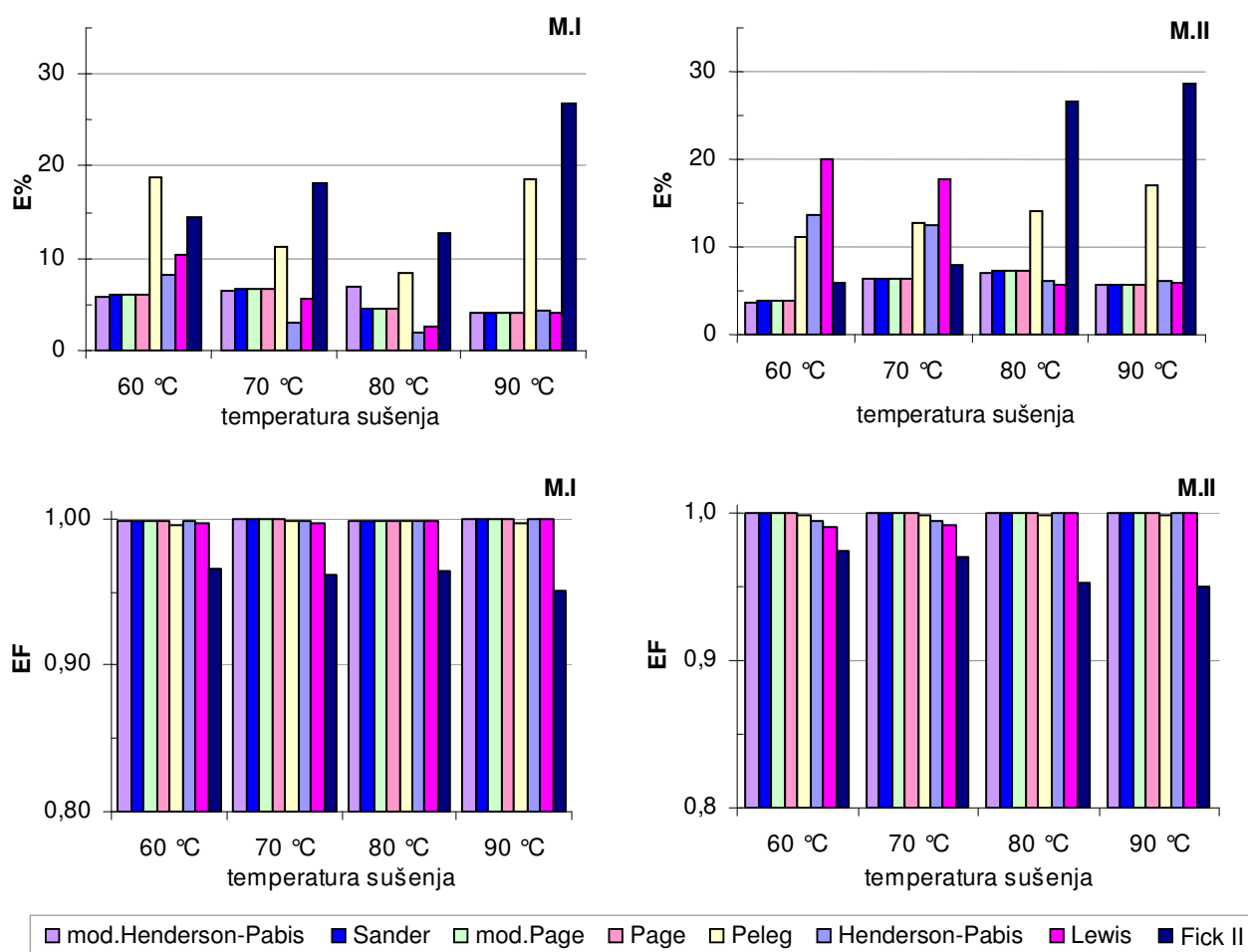
*Rezultati primjene matematičkih modela***Tablica 4.3** Procijenjeni parametri matematičkih modela te koeficijenti korelacije (R) i ukupno kvadratno odstupanje (FL) između eksperimentalnih i izračunatih vrijednosti za konvekcijsko sušenje mrkve u fluidiziranom sloju (uzorci M.I i M.II)

temperatura sušenja	uzorak: M.I				uzorak: M.II			
	60 °C	70 °C	80 °C	90 °C	60 °C	70 °C	80 °C	90 °C
parametar $K_F, \text{min}^{-1}$	<b>Fick</b>							
R	0,0351	0,0437	0,0454	0,0655	0,0307	0,0387	0,0521	0,0645
FL	0,9829	0,9808	0,9794	0,9750	0,9866	0,9846	0,9762	0,9748
	0,0491	0,0445	0,0459	0,0459	0,0412	0,0402	0,0491	0,0463
parametar $K_L, \text{min}^{-1}$	<b>Lewis</b>							
R	0,0431	0,0538	0,0557	0,0798	0,0381	0,0479	0,0638	0,0786
FL	0,9982	0,9986	0,9988	0,9997	0,9949	0,9957	0,9996	0,9998
	0,0052	0,0033	0,0028	0,0005	0,0157	0,0112	0,0008	0,0004
parametri $k, \text{min}^{-n}$	<b>Page</b>							
$n$	0,0564	0,0691	0,0674	0,0798	0,0666	0,0780	0,0671	0,0782
R	0,9208	0,9206	0,9391	1,0003	0,8411	0,8517	0,9831	1,0020
FL	0,9992	0,9996	0,9993	0,9997	0,9998	0,9996	0,9996	0,9998
	0,0023	0,0011	0,0016	0,0005	0,0007	0,0010	0,0008	0,0004
parametri $t_k, \text{min}$	<b>Sander</b>							
$n$	22,72	18,22	17,68	12,52	25,05	19,98	15,62	12,72
R	0,9208	0,9206	0,9391	1,0003	0,8411	0,8517	0,9831	1,0020
FL	0,9992	0,9996	0,9993	0,9997	0,9998	0,9996	0,9996	0,9998
	0,0023	0,0011	0,0016	0,0005	0,0007	0,0010	0,0008	0,0004
parametri $k', \text{min}^{-1}$	<b>modificirani Page</b>							
$n'$	0,0440	0,0549	0,0566	0,0798	0,0399	0,0500	0,0640	0,0786
R	0,9208	0,9206	0,9391	1,0003	0,8411	0,8517	0,9831	1,0020
FL	0,9992	0,9996	0,9993	0,9997	0,9998	0,9996	0,9996	0,9998
	0,0023	0,0011	0,0016	0,0005	0,0007	0,9996	0,0008	0,0004
parametri $K_1, \text{min}$	<b>Peleg</b>							
$K_2$	17,2914	14,1969	14,0638	10,1998	18,0024	14,5276	12,8044	10,4452
R	0,8173	0,8045	0,7912	0,7731	0,8533	0,8468	0,7706	0,7682
FL	0,9980	0,9993	0,9990	0,9987	0,9992	0,9993	0,9992	0,9990
	0,0057	0,0017	0,0022	0,0024	0,0024	0,0018	0,0016	0,0018
parametri $G, \text{min}^{-1}$	<b>Henderson-Pabis</b>							
$S$	0,9684	0,9737	0,9783	0,9975	0,9386	0,9499	0,9933	0,9978
R	0,0417	0,0524	0,0545	0,0797	0,0356	0,0454	0,0634	0,0785
FL	0,9988	0,9990	0,9991	0,9997	0,9972	0,9973	0,9996	0,9998
	0,0035	0,0023	0,0021	0,0005	0,0087	0,0072	0,0008	0,0004
parametri $G', \text{min}^{-N}$	<b>Modificirani Henderson-Pabis</b>							
$S'$	0,9895	0,9932	0,9917	0,9968	0,9931	0,9950	0,9961	0,9968
$N$	0,0537	0,0671	0,0650	0,0788	0,0647	0,0765	0,0660	0,0772
R	0,9324	0,9278	0,9483	1,0037	0,8476	0,8563	0,9874	1,0055
FL	0,9992	0,9996	0,9993	0,9997	0,9998	0,9996	0,9996	0,9998
	0,0022	0,0010	0,0015	0,0005	0,0007	0,0010	0,0007	0,0004

*Statistički pokazatelji uspješnosti aproksimacije*

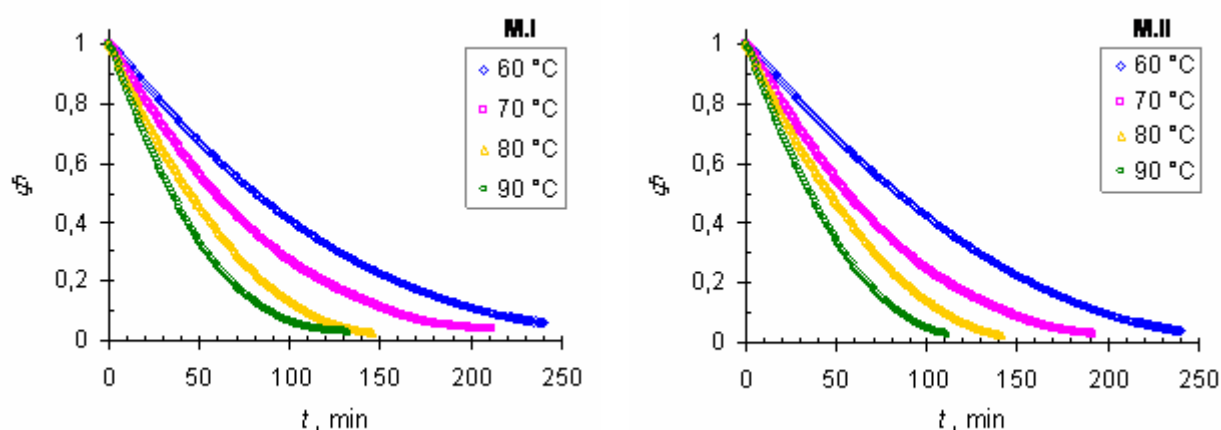


**Slika 4.9** Srednje apsolutno odstupanje [MEB], srednje odstupanje [RMSE] i reducirani chi-kvadrat [ $\chi^2$ ] aproksimacije eksperimentalnih podataka sušenja mrkve u fluidiziranom sloju (uzorci [M.I, MK.II]) s odabranim modelima za različite temperature sušenja



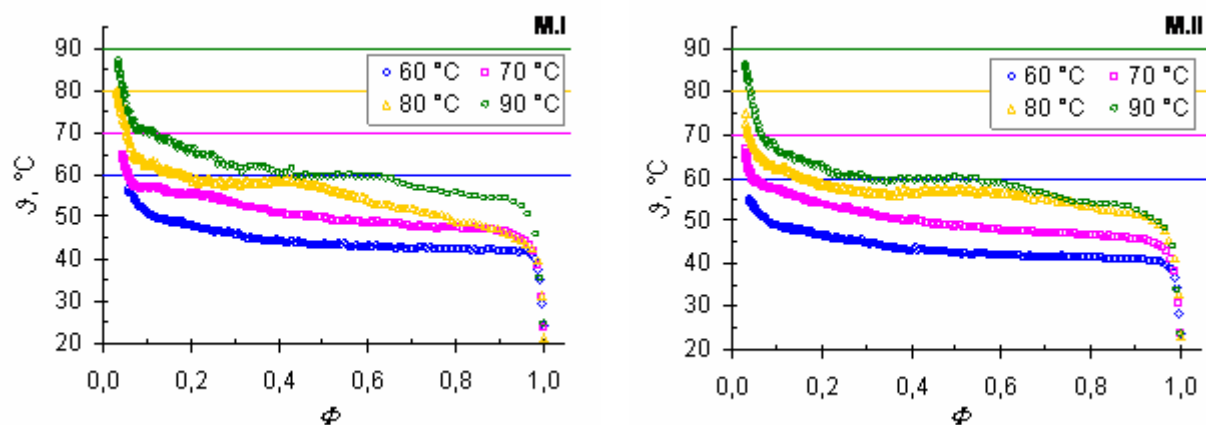
**Slika 4.10** Srednja relativna pogreška [E%] i efikasnost odabranih modela [EF] u predviđanju kinetike sušenja mrkve u fluidiziranom sloju (uzorci [M.I, M.II]) za različite temperature sušenja

## 4.1.2.2. Infracrveno sušenje mrkve [IR\_M]

*Eksperimentalni rezultati sušenja*

**Slika 4.11** Eksperimentalni podaci infracrvenog sušenja mrkve (uzorci [M.I, M.II]) za različite temperature sušenja (ovisnost bezdimenzionalne vlažnosti [ $\Phi$ ] o vremenu sušenja [ $t$ ])

Regresijskom analizom prikazanih eksperimentalnih rezultata procijenjeni su parametri kinetičkih matematičkih modela (*Tablica 4.4*), a slaganje eksperimentalnih i (prema modelima) izračunatih vrijednosti određeno je pomoću statističkih parametara (*Slike 4.13-14*).

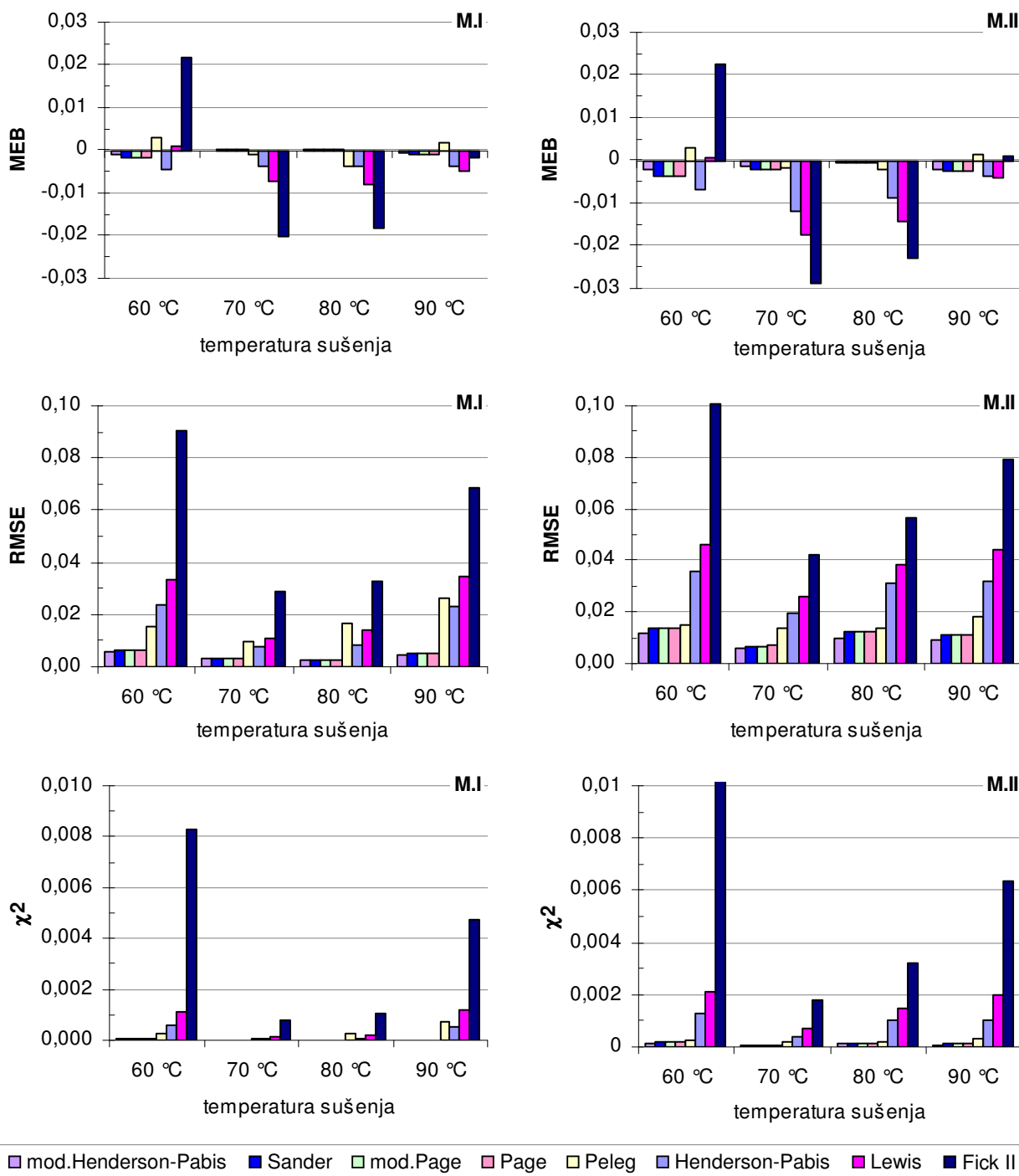


**Slika 4.12** Ovisnost temperature materijala [ $\vartheta$ ] o bezdimenzionalnoj vlažnosti materijala [ $\Phi$ ] za infracrveno sušenje mrkve [M.I, M.II] pri različitim temperaturama sušenja

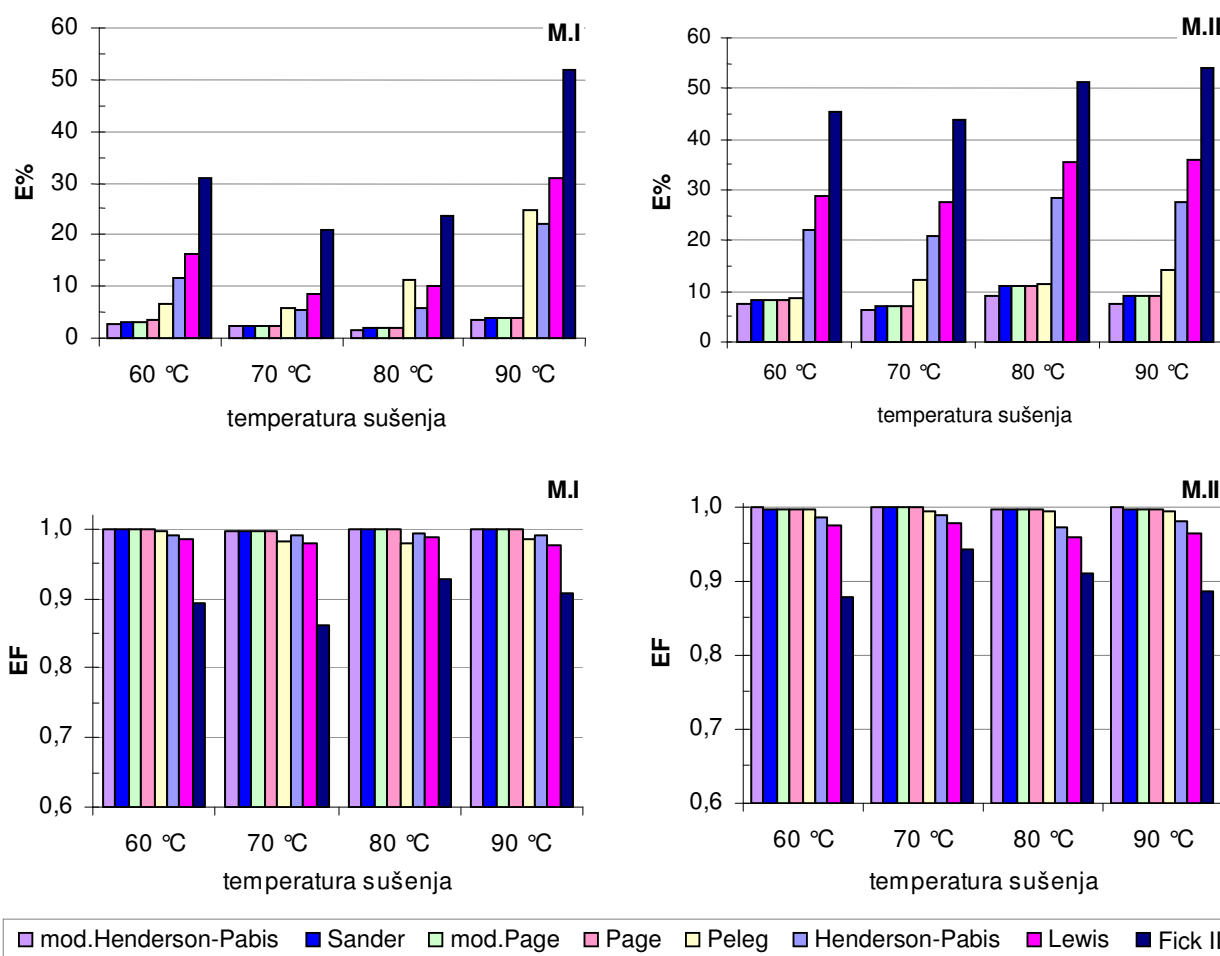
*Rezultati primjene matematičkih modela***Tablica 4.4** Procijenjeni parametri matematičkih modela te koeficijenti korelacije (R) i ukupno kvadratno odstupanje (FL) između eksperimentalnih i izračunatih vrijednosti za infracrveno sušenje mrkve (uzorci M.I i M.II)

temperatura sušenja	uzorak: M.I				uzorak: M.II			
	60 °C	70 °C	80 °C	90 °C	60 °C	70 °C	80 °C	90 °C
parametar $K_F, \text{min}^{-1}$	<b>Fick</b>							
R	0,0073	0,0105	0,0141	0,0182	0,0074	0,0110	0,0135	0,0178
FL	2,3425	1,5213	1,3198	1,0206	2,4410	1,5773	1,4187	1,1055
parametar $K_L, \text{min}^{-1}$	<b>Lewis</b>							
R	0,0092	0,0129	0,0175	0,0223	0,0093	0,0136	0,0168	0,0220
FL	0,9875	0,9940	0,9893	0,9923	0,9871	0,9917	0,9870	0,9877
parametri $k, \text{min}^{-n}$	<b>Page</b>							
$n$	0,0023	0,0052	0,0055	0,0085	0,0022	0,0045	0,0047	0,0067
R	1,2948	1,2816	1,2765	1,2436	1,3016	1,2500	1,3051	1,3042
FL	0,9990	0,9998	0,9991	0,9998	0,9989	0,9996	0,9987	0,9992
parametri $t_k, \text{min}$	<b>Sander</b>							
$n$	107,80	79,12	58,79	46,21	109,18	75,29	60,79	46,57
R	1,2173	1,2024	1,2770	1,2438	1,3026	1,2410	1,3054	1,3043
FL	0,9997	0,9998	0,9991	0,9998	0,9989	0,9996	0,9987	0,9992
parametri $k', \text{min}^{-1}$	<b>modificirani Page</b>							
$n'$	0,0091	0,0126	0,0170	0,0216	0,0092	0,0133	0,0165	0,0215
R	1,2952	1,2824	1,2770	1,2438	1,3026	1,2500	1,3054	1,3043
FL	0,9990	0,9998	0,9991	0,9998	0,9989	0,9996	0,9987	0,9992
parametri $K_1, \text{min}$	<b>Peleg</b>							
$K_2$	130,2596	79,8612	64,5969	46,1537	128,3993	79,7439	70,0732	52,6359
R	0,4506	0,6128	0,5366	0,6219	0,4666	0,5708	0,4892	0,5092
FL	0,9989	0,9972	0,9978	0,9954	0,9986	0,9978	0,9984	0,9978
parametri $G$	<b>Henderson-Pabis</b>							
$S, \text{min}^{-1}$	1,0726	1,0732	1,0866	1,0856	1,0909	1,0823	1,0908	1,0933
R	0,0101	0,0139	0,0190	0,0242	0,0102	0,0147	0,0184	0,0241
FL	0,9963	0,9970	0,9936	0,9960	0,9924	0,9956	0,9921	0,9929
parametri $G'$	<b>modificirani Henderson-Pabis</b>							
$S', \text{min}^{-N}$	1,0726	1,0732	1,0866	1,0856	1,0909	1,0823	1,0908	1,0933
$N$	0,9847	0,9877	0,9711	0,9862	0,9690	0,9816	0,9664	0,9734
R	0,0028	0,0047	0,0041	0,0075	0,0015	0,0039	0,0033	0,0051
FL	1,2488	1,2238	1,3376	1,2705	1,3754	1,2778	1,3813	1,3629
	0,9998	0,9999	0,9994	0,9999	0,9992	0,9997	0,9990	0,9994
	0,0080	0,0049	0,0161	0,0033	0,0308	0,0107	0,0232	0,0113

*Statistički pokazatelji uspješnosti aproksimacije*



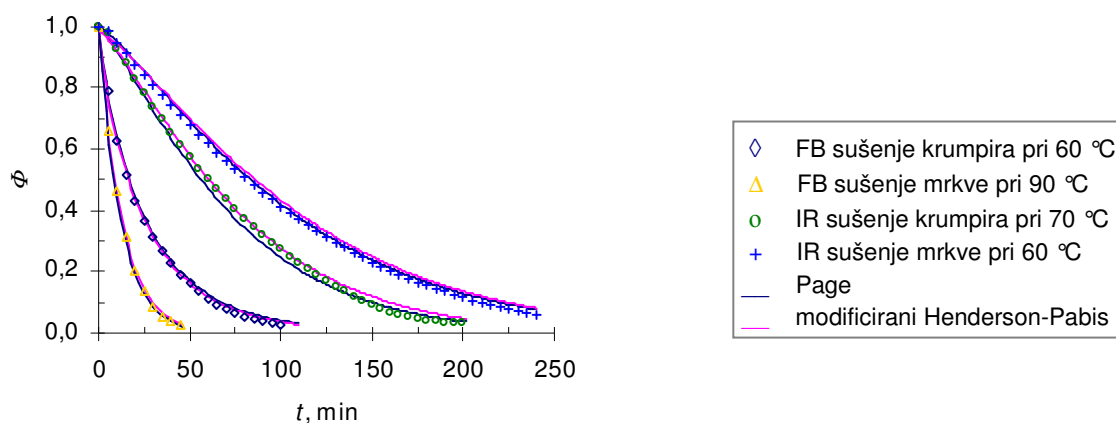
**Slika 4.13** Srednje apsolutno odstupanje [MEB], srednje odstupanje [RMSE] i reducirani chi-kvadrat [ $\chi^2$ ] aproksimacije eksperimentalnih podataka infracrvenog sušenja mrkve (uzorci [M.I, M.II]) s odabranim modelima za različite temperature sušenja



**Slika 4.14** Srednja relativna pogreška [E%] i efikasnost odabranih modela [EF] u predviđanju kinetike infracrvenog sušenja mrkve (uzorci [M.I, M.II]) za različite temperature sušenja

Vrijednosti statističkih parametara (*Tablice 4.1-4, Slike 4.2-3, 4.6-7, 4.6-10, 4.13-14*) pokazale su da su novopredloženi modificirani Henderson-Pabis model i Page model, kao i modifikacije Pageova modela (Sander, modificirani Page) najbolje aproksimirali eksperimentalne podatke sušenja krumpira i mrkve. Naime, navedeni su modeli, za oba načina sušenja svih uzoraka povrća pri svim temperaturama sušenja, imali najveće vrijednosti koeficijenta korelacije ( $R$ ) i efikasnosti modela ( $EF$ ) čije su vrijednosti iznosile  $\sim 1$ , kao i najmanje vrijednosti (najbliže nuli) za ukupno kvadratno odstupanje ( $FL$ ), srednje apsolutno odstupanje ( $MEB$ ), srednje kvadratno odstupanje ( $RSEM$ ), srednju relativnu pogrešku ( $E\%$ ) aproksimacije i reducirani chi-kvadrat ( $\chi^2$ ), što zajedno ukazuje na najbolje slaganje eksperimentalnih i izračunatih vrijednosti. Dobro slaganje eksperimentalni vrijednosti i aproksimacijskih krivulja ova dva modela jasno je vidljivo i na *slici 4.15*.

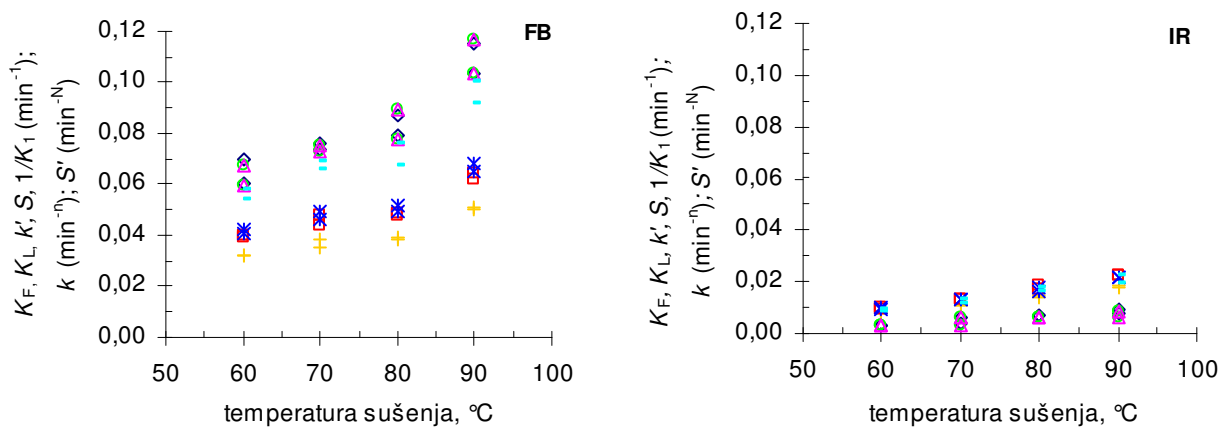




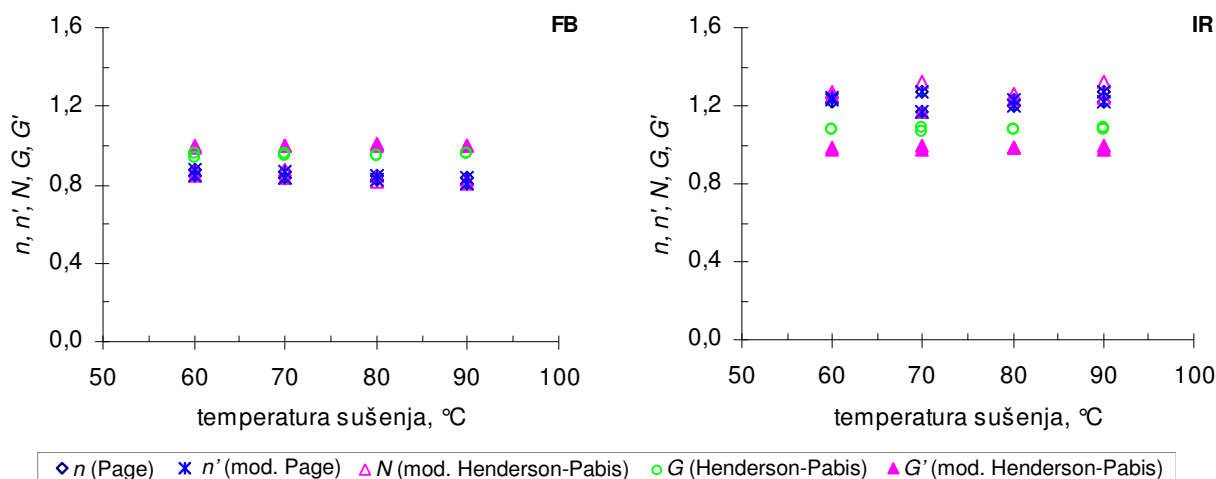
**Slika 4.15** Primjer slaganja eksperimentalnih i aproksimacijskih krivulja konvekcijskog sušenja u fluidiziranom sloju [FB] i infracrvenog sušenja [IR] krumpira i mrkve pri različitim temperaturama sušenja

#### 4.1.3. Utjecaj načina i temperature sušenja na procijenjene parametre matematičkih modela sušenja

##### Za sušenje krumpira

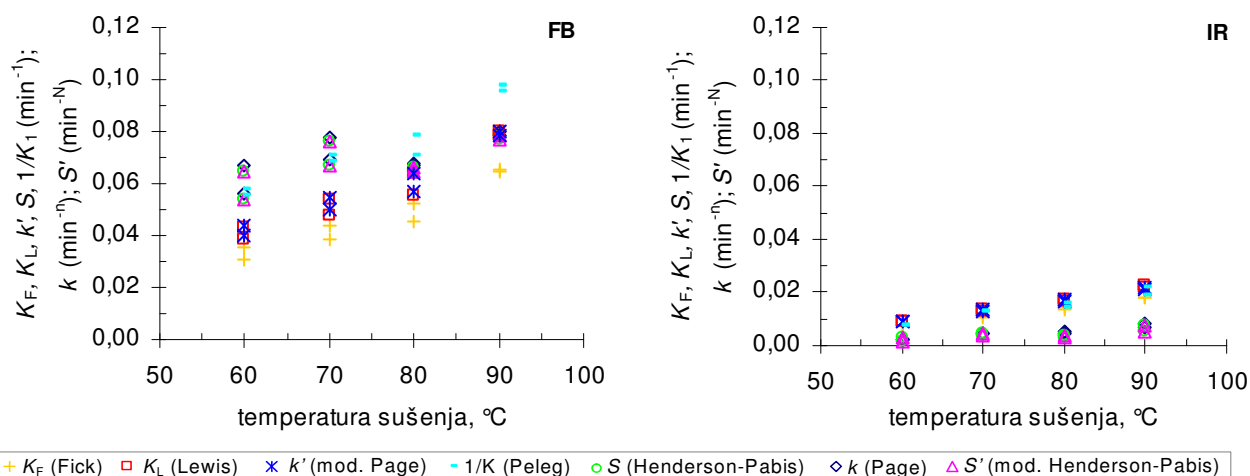


**Slika 4.16** Utjecaj temperature sušenja na parametre svih odabranih modela, koji u sebi sadrže dimenziju vremena, za oba uzorka krumpira (K.I, K.II) sušena konvekcijski u fluidiziranom sloju [FB], odnosno radijacijskim [IR] načinom sušenja

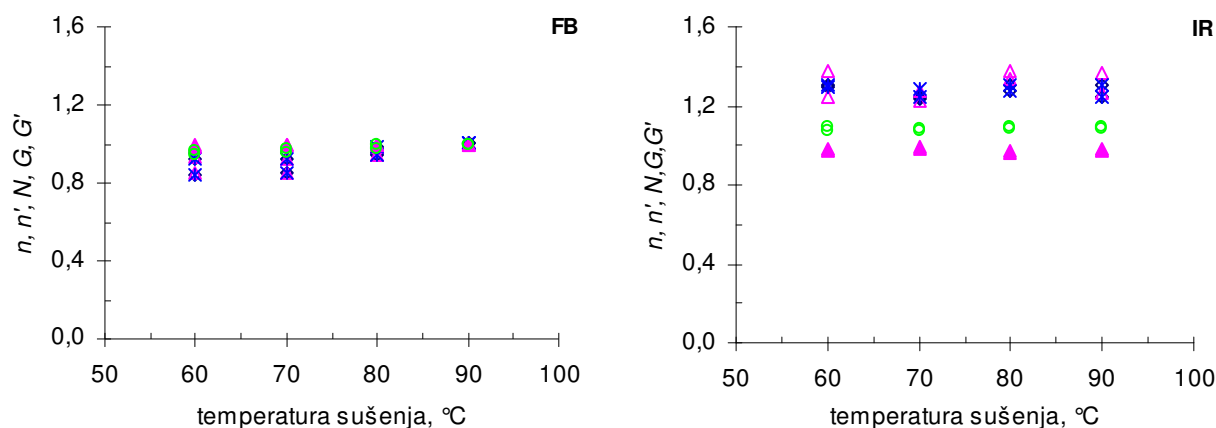


**Slika 4.17** Utjecaj temperature sušenja na bezdimenzionalne parametre odabranih modela [ $n$ ,  $n'$ ,  $N$ ,  $G$ ,  $G'$ ] za oba uzorka krumpira (K.I, K.II) sušena konvekcijski u fluidiziranom sloju [FB], odnosno radijacijskim [IR] načinom sušenja

#### Za sušenje mrkve



**Slika 4.18** Utjecaj temperature sušenja na parametre svih odabranih modela, koji u sebi sadrže dimenziju vremena, za oba uzorka mrkve (M.I, M.II) sušena konvekcijski u fluidiziranom sloju [FB], odnosno radijacijskim [IR] načinom sušenja



**Slika 4.19** Utjecaj temperature sušenja na bezdimenzionalne parametre modela [ $n$ ,  $n'$ ,  $N$ ,  $G$ ,  $G'$ ] za oba uzorka mrkve (M.I, M.II) sušena konvekcijski u fluidiziranom sloju [FB], odnosno radijacijskim [IR] načinom sušenja

Kako su se modificirani Henderson-Pabis model i Page model pokazali najprikladnijim za opisivanje kinetike sušenja pri postavljenim pokusnim uvjetima, provedeno je utvrđivanje (ne)postojanja utjecaja različitosti uzoraka, temperature sušenja i načina sušenja na vrijednosti procijenjenih parametara modela (Tablica 4.5) za svako povrće primjenom faktorske analize varijance (ANOVA). Također su određene i funkcionalne ovisnosti njihovih parametara o temperaturi sušenja prema slikama 4.16-19 (Tablica 4.6).

**Tablica 4.5** Vrijednosti Fisherova faktora ( $F$ ) za značajnost utjecaja uzorka, temperature sušenja i načina sušenja na parametre Pageova, Henderson-Pabisova i modificiranog Henderson-Pabisova modela

POVRĆE	FAKTOR UTJECAJA	$F$ - koeficijent						
		Page model		Henderson-Pabis model		modificirani Henderson-Pabis model		
		$k$	$n$	$G$	$S$	$G'$	$S'$	$N$
krumpir	uzorak (I, II)	0,15 <sup>ns</sup>	0,57 <sup>ns</sup>	0,08 <sup>ns</sup>	0,18 <sup>ns</sup>	1,91 <sup>ns</sup>	0,00 <sup>ns</sup>	0,83 <sup>ns</sup>
	način sušenja	1049,45 <sup>**</sup>	523,95 <sup>**</sup>	772,53 <sup>**</sup>	1845,19 <sup>**</sup>	15,14 <sup>**</sup>	874,14 <sup>**</sup>	320,85 <sup>**</sup>
	temperatura sušenja	19,81 <sup>**</sup>	0,23 <sup>ns</sup>	0,54 <sup>ns</sup>	120,28 <sup>**</sup>	0,18 <sup>ns</sup>	17,24 <sup>**</sup>	0,14 <sup>ns</sup>
	interakcija <sup>a</sup>	12,73 <sup>**</sup>	0,75 <sup>ns</sup>	0,01 <sup>ns</sup>	9,72 <sup>**</sup>	0,31 <sup>ns</sup>	11,98 <sup>**</sup>	0,54 <sup>ns</sup>
mrkva	uzorak (I, II)	1,09 <sup>ns</sup>	0,00 <sup>ns</sup>	0,008 <sup>ns</sup>	0,14 <sup>ns</sup>	1,90 <sup>ns</sup>	0,95 <sup>ns</sup>	0,93 <sup>ns</sup>
	način sušenja	1454,23 <sup>**</sup>	376,83 <sup>**</sup>	308,82 <sup>**</sup>	537,67 <sup>**</sup>	38,35 <sup>**</sup>	1193,97 <sup>**</sup>	202,15 <sup>**</sup>
	temperatura sušenja	7,87 <sup>*</sup>	3,47 <sup>ns</sup>	4,26 <sup>ns</sup>	46,21 <sup>**</sup>	1,97 <sup>ns</sup>	6,90 <sup>*</sup>	3,04 <sup>ns</sup>
	interakcija <sup>a</sup>	2,76 <sup>ns</sup>	2,87 <sup>ns</sup>	1,56 <sup>ns</sup>	10,94 <sup>**</sup>	1,51 <sup>ns</sup>	2,98 <sup>ns</sup>	0,81 <sup>ns</sup>

<sup>a</sup> interakcija: način sušenja / temperatura sušenja

<sup>ns</sup> utjecaj faktora nije statistički opravdan

\* utjecaj faktora je statistički opravdan uz  $P = 5\%$

\*\* utjecaj faktora je statistički opravdan uz  $P = 1\%$

**Tablica 4.6** Funkcionalne ovisnosti parametara modificiranog Henderson-Pabisova i Pageova modela o temperaturi sušenja za oba načina sušenja krumpira i mrkve (za eksperimentalne uvjete sušenja)

sušenje/povrće		modificirani Henderson-Pabis	Page
FB	krumpir	$G' = 0,0002 \cdot \vartheta + 0,9816$ $S' = 0,0015 \cdot \vartheta - 0,029$ $N = -0,0017 \cdot \vartheta + 0,9688$	$k = 0,0014 \cdot \vartheta - 0,0234$ $n = -0,0015 \cdot \vartheta + 0,9525$
	mrkva	$G' = 0,0002 \cdot \vartheta + 0,9818$ $S' = 0,0005 \cdot \vartheta + 0,031$ $N = 0,0042 \cdot \vartheta + 0,6238$	$k = 0,0005 \cdot \vartheta + 0,0357$ $n = 0,0026 \cdot \vartheta + 0,7524$
IR	krumpir	$G' = -0,0001 \cdot \vartheta + 0,9948$ $S' = 0,0006 \cdot \exp(0,0271 \cdot \vartheta)$ $N = 0,0011 \cdot \vartheta + 1,175$	$k = 0,0007 \cdot \exp(0,0281 \cdot \vartheta)$ $n = 0,0007 \cdot \vartheta + 1,1756$
	mrkva	$G' = -3 \cdot 10^{-5} \cdot \vartheta + 0,9862$ $S' = 0,0004 \cdot \exp(0,0298 \cdot \vartheta)$ $N = 0,001 \cdot \vartheta + 1,2667$	$k = 0,0005 \cdot \exp(0,0283 \cdot \vartheta)$ $n = 0,0007 \cdot \vartheta + 1,2366$

$\vartheta$  – temperatura sušenja, °C

FB – konvekcijsko sušenje u fluidiziranom sloju

IR – infracrveno sušenje

Uvrštavanjem dobivenih funkcionalnih ovisnosti parametara modela o temperaturi sušenja (navedenih u *Tablici 4.6*) u matematičke modele (3.11), odnosno (3.15), dobivaju se nešto „složenije“ jednadžbe (*Tablica 4.7*). Navedeni izrazi omogućuju provedbu simulacije sušenja krumpira i mrkve za šire područje temperature sušenja, odnosno uvrštavanjem određene temperature sušenja ( $\vartheta$ , °C) moguće je direktno izračunavanje bezdimenzionalne vlažnosti ( $\Phi$ ) povrća u pojedinom trenutku ( $t$ , min) sušenja.

Konkretan primjer primjene dobivenih izraza za simulaciju sušenja prikazan je krivuljama sušenja (ovisnost brzine sušenja o vlažnosti povrća) za različite temperature sušenja, pri čemu po dvije krivulje odgovaraju temperaturama sušenja već primijenjenim u prethodnom eksperimentalnom radu, a preostale tri temperature proizvoljno su odabrane (*Slike 4.20-21*). Brzine sušenja povrća procijenjene su prema izrazima (4.1), (4.2), kao prve derivacije matematičkih modela ((3.11), (3.15)):

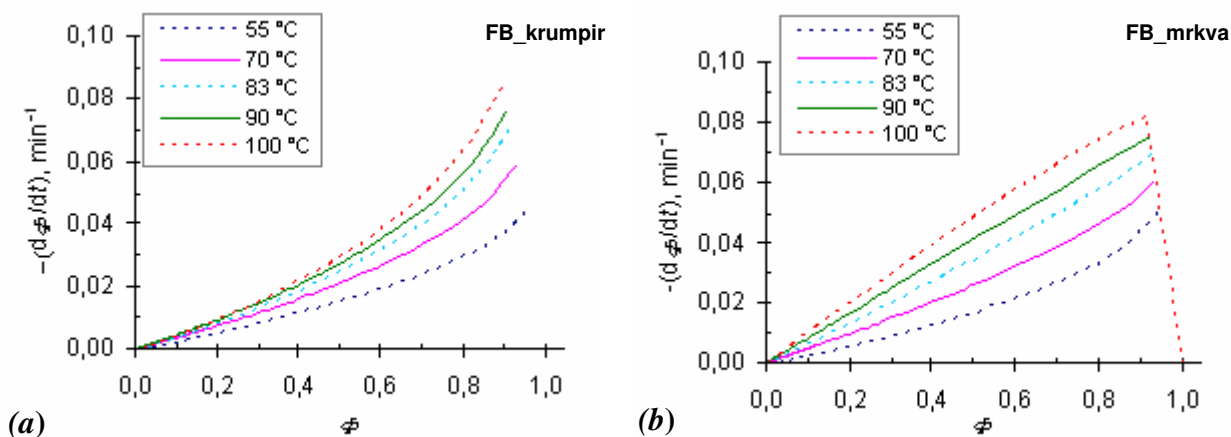
$$-\left(\frac{d\Phi}{dt}\right) = S' \cdot N \cdot t^{(N-1)} \cdot G' \cdot \exp(-S' \cdot t^N) \quad (4.1)$$

$$-\left(\frac{d\Phi}{dt}\right) = k \cdot n \cdot t^{(n-1)} \cdot \exp(-k \cdot t^n) \quad (4.2)$$

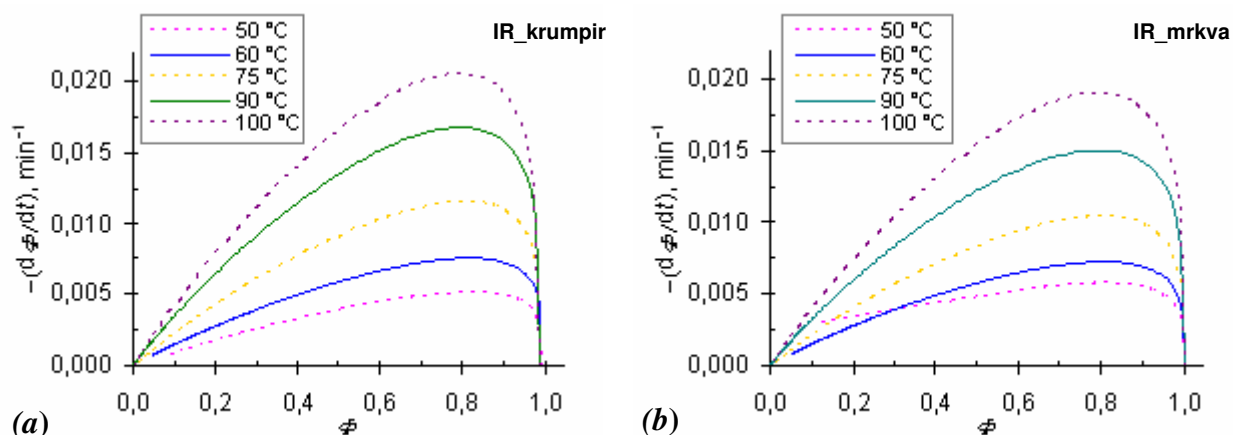
**Tablica 4.7** Matematički izrazi koji omogućuju simulaciju kinetike FB i IR sušenja krumpira i mrkve pri određenim temperaturama sušenja, odnosno procjenu vlažnosti ( $\Phi$ ) povrća u određenom vremenu ( $t$ , min) i određenoj temperaturi sušenja ( $\vartheta$ , °C)

model*		FB sušenje (konvekcijsko sušenje u fluidiziranom sloju)
krumpir	m.HP	$\Phi = (0,0002 \cdot \vartheta + 0,9816) \cdot \exp\left[-(0,0015 \cdot \vartheta - 0,029) \cdot t^{(-0,0017 \cdot \vartheta + 0,9688)}\right]$
	P	$\Phi = \exp\left[-(0,0015 \cdot \vartheta - 0,0234) \cdot t^{(-0,0015 \cdot \vartheta + 0,9525)}\right]$
mrkva	m.HP	$\Phi = (0,0002 \cdot \vartheta + 0,9818) \cdot \exp\left[-(0,0005 \cdot \vartheta + 0,031) \cdot t^{(0,0042 \cdot \vartheta + 0,6238)}\right]$
	P	$\Phi = \exp\left[-(0,0005 \cdot \vartheta + 0,0357) \cdot t^{(0,0026 \cdot \vartheta + 0,7524)}\right]$
		IR sušenje (infracrveno sušenje)
krumpir	m.HP	$\Phi = (-0,0001 \cdot \vartheta + 0,9948) \cdot \exp\left[-(0,0006 \cdot \exp(0,0271 \cdot \vartheta)) \cdot t^{(0,0011 \cdot \vartheta + 1,175)}\right]$
	P	$\Phi = \exp\left[-(0,0007 \cdot \exp(0,0281 \cdot \vartheta)) \cdot t^{(0,0007 \cdot \vartheta + 1,1756)}\right]$
mrkva	m.HP	$\Phi = (-3 \cdot 10^{-5} \cdot \vartheta + 0,9862) \cdot \exp\left[-(0,0004 \cdot \exp(0,0298 \cdot \vartheta)) \cdot t^{(0,001 \cdot \vartheta + 1,2667)}\right]$
	P	$\Phi = \exp\left[-(0,0005 \cdot \exp(0,00283 \cdot \vartheta)) \cdot t^{(0,0007 \cdot \vartheta + 1,2366)}\right]$

\* m.HP – modificirani Henderson-Pabis model; P – Page model



**Slika 4.20** Krivulje konvekcijskog sušenja krumpira i mrkve u fluidiziranom sloju za različite temperature sušenja (ovisnost brzine sušenja  $[-(d\Phi/dt)]$  o vlažnosti povrća ( $\Phi$ ) prema Page modelu (a), odnosno modificiranom Henderson-Pabis modelu (b)



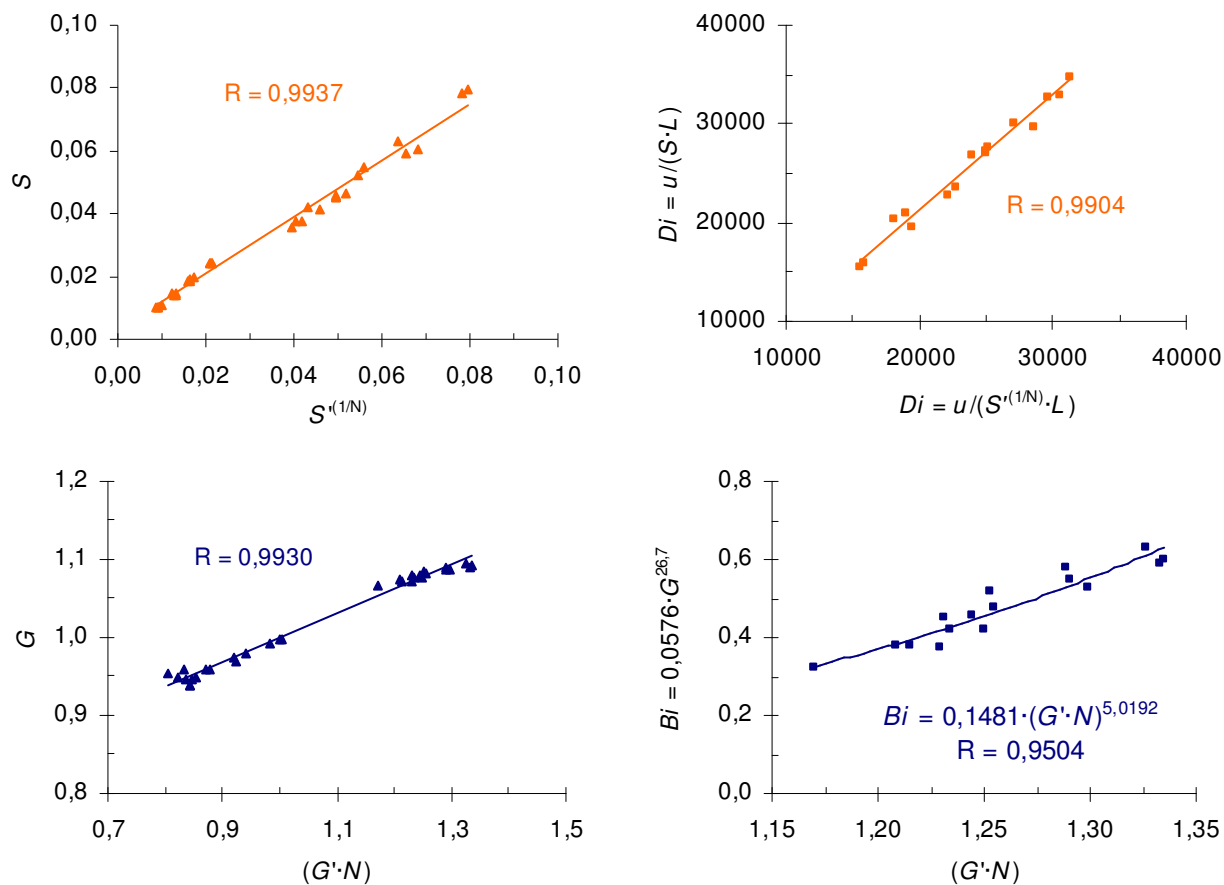
**Slika 4.21** Krivulje infracrvenog sušenja krumpira i mrkve za različite temperature sušenja (ovisnost brzine sušenja  $[-(d\Phi/dt)]$  o vremenu sušenja ( $t$ ]) prema modificiranom Henderson-Pabis modelu (a), odnosno Page modelu (b)

Matematički izrazi navedeni u *tablici 4.7* korišteni su i u drugom dijelu eksperimentalnog rada za određivanje vremena sušenja ( $t_f$ ) potrebnog kako bi se sušenjem pri određenoj temperaturi i načinu sušenja postigla željena (određena, konačna) vlažnosti sušenog materijala, kao slijedi:

$$t_f = \sqrt[N']{\frac{1}{S'}} \cdot \ln \frac{G}{\Phi_f} \quad (4.3)$$

#### 4.1.4. Vrijednosti koeficijenta efektivne difuzije vlage za sušenja

Koeficijent efektivne difuzije vlage ( $D_{ef}$ ) određen je za različite načine i temperature sušenja krumpira i mrkve prema procijenjenim parametrima Fickova, Lewisova, Pageova i Henderson-Pabisova modela danim u *Tablici 3.1*. Izrazi za izračunavanje  $D_{ef}$  te  $Bi$ -broja i  $Di$ -broja iz modificiranog Henderson-Pabis modela (*Tablica 3.2*) predloženi su s obzirom na međusobne (linearne) odnose procijenjenih parametara Henderson-Pabisova i modificiranog Henderson-Pabis modela (*Slika 4.22*).



**Slika 4.22** Odnosi procijenjenih parametara modificiranog Henderson-Pabis i Henderson-Pabisova modela i  $Bi$  brojevima za infracrveno sušenje krumpira i mrkve pri svim temperaturama sušenja

Dobivene vrijednosti koeficijenata međusobno su uspoređene (ANOVA / *post hoc* LSD-test), određena je njihova ovisnost o temperaturi sušenja (prema Arrheniusu) te je izračunata energija aktivacije za difuziju vlage. Također su procijenjene vrijednosti  $D_{ef}$  stavljene u odnos s parametrima modela prema kojima su izračunate.

**Tablica 4.8** Izračunate vrijednosti koeficijenta efektivne difuzije ( $D_{ef}$ ) za konvekcijsko sušenje u fluidiziranom sloju (FB) i infracrveno sušenje (IR) krumpira i mrkve prema različitim matematički modelima

matematički model		Fick	Lewis	Page	Henderson-Pabis	modificirani Henderson-Pabis	
sušenje	$\vartheta$	$*D_{ef} \cdot 10^9, m^2/s$					
krumpir	FB	60 °C	1,36	1,68	2,74	10,48	11,18
		70 °C	1,56	1,94	3,15	11,63	12,44
		80 °C	1,64	2,04	3,51	12,05	13,00
		90 °C	2,14	2,66	4,61	14,71	15,87
	IR	60 °C	0,33	0,41	0,14	3,31	2,88
		70 °C	0,45	0,56	0,22	4,43	4,08
		80 °C	0,61	0,75	0,30	6,01	5,32
		90 °C	0,76	0,94	0,35	6,75	6,18
mrkva	FB	60 °C	1,39	1,71	2,60	10,67	11,23
		70 °C	1,74	2,15	3,11	12,66	13,25
		80 °C	2,06	2,52	2,84	14,50	14,66
		90 °C	2,75	3,35	3,34	17,91	17,89
	IR	60 °C	0,31	0,39	0,10	2,97	2,47
		70 °C	0,45	0,56	0,19	4,46	4,00
		80 °C	0,58	0,72	0,22	4,79	4,02
		90 °C	0,76	0,94	0,32	6,14	5,65

\* vrijednosti  $D_{ef}$  predstavljaju srednju vrijednost koeficijenta za dva različita uzorka svakog povrća određenih pri istim uvjetima pokusa sušenja (obzirom da prethodne analize nisu pokazale statistički opravdanu razliku između navedenih uzoraka)

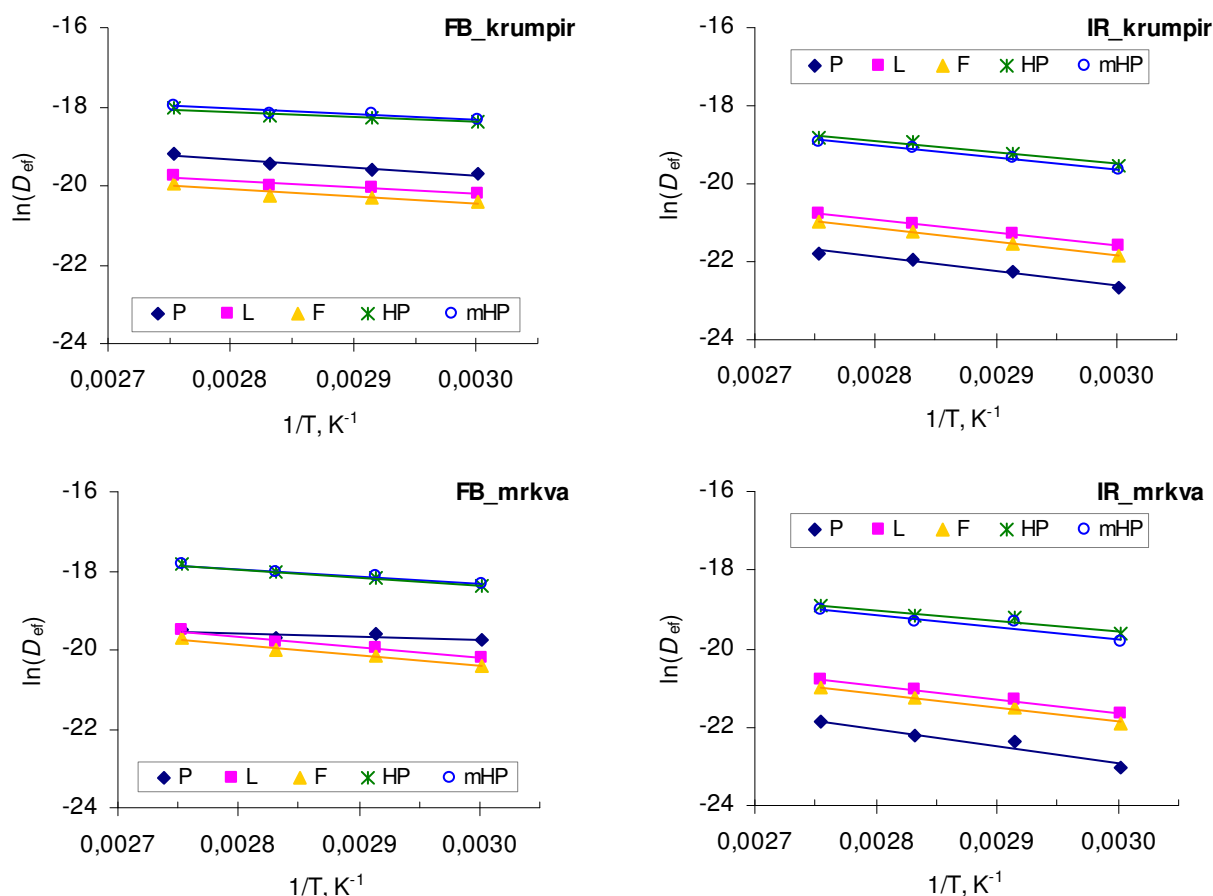
Analiza varijance i *post hoc* LSD-test nije pokazao da postoji opravdana razlika između vrijednosti  $D_{ef}$  za krumpir i za mrkvu,  $p$ -vrijednost iznosila je 0,8701 ( $> 0,05$ ).

**Tablica 4.9** Vrijednosti statističkog pokazatelja za utvrđivanje postojanja razlike ( $p$ -vrijednost) i korelacije (indeks korelacije) između vrijednosti efektivnog koeficijenta difuzije vlage kod sušenja određenih prema različitim modelima

MODEL	$p$ – vrijednost ( $p < 0,0500$ statistički značajno)				
	Fick	Lewis	Page	H.Pabis <sup>a</sup>	mod.H.Pabis <sup>b</sup>
Fick		0,8097	0,6307	0,0000	0,0000
Lewis	0,8097		0,8102	0,0000	0,0000
Page	0,6307	0,8102		0,0000	0,0000
H.Pabis <sup>a</sup>	0,0000	0,0000	0,0000		0,9718
mod.H.Pabis <sup>b</sup>	0,0000	0,0000	0,0000	0,9718	
	indeks korelacije (R)				
Fick		0,9999	0,9148	0,9963	0,9966
Lewis	0,9999		0,9199	0,9966	0,9910
Page	0,9148	0,9199		0,9258	0,9538
H.Pabis <sup>a</sup>	0,9963	0,9966	0,9258		0,9963
mod.H.Pabis <sup>b</sup>	0,9897	0,9910	0,9538	0,9963	

<sup>a</sup> Henderson-Pabis model; <sup>b</sup> modificirani Henderson-Pabis model





**Slika 4.23** Ovisnost koeficijenta efektivne difuzije vlage o temperaturi sušenja (prema Arrheniusu) za sve uzorke krumpira i mrkve sušene konvekcijski u fluidiziranom sloju [FB], odnosno infracrvenim načinom sušenja [IR], ovisno o matematičkom modelu (Page [P]; Lewis [L]; Fick [F]; Henderson-Pabis [HP]; modificirani Henderson-Pabis [mHP])

**Tablica 4.10** Vrijednosti energije aktivacije [ $E_a$ ] za efektivnu difuziju vlage tijekom konvekcijskog sušenja u fluidiziranom sloju [FB] i infracrvenog sušenja [IR] krumpira i mrkve određene prema Arrheniusu, tj. ovisnostima prikazanim na slici 4.23

SUŠENJE	MODEL	$E_a$ , kJ/mol		$D_o \cdot 10^7$ , m <sup>2</sup> /s	
		krumpir	mrkva	krumpir	mrkva
FB	Fick	14,10	22,24	2,17	4,21
	Lewis	14,30	21,85	2,88	4,51
	Page	16,70	6,65	11,09	0,03
	Henderson-Pabis	10,53	16,96	4,62	4,83
	modificirani Henderson-Pabis	10,96	15,04	5,76	2,55
IR	Fick	28,27	29,66	9,03	14,18
	Lewis	28,01	29,12	13,80	14,64
	Page	30,93	36,71	10,53	62,48
	Henderson-Pabis	24,66	22,72	24,97	11,47
	modificirani Henderson-Pabis	25,81	25,09	33,37	22,73

#### 4.1.5. Vrijednosti Biotova broja i koeficijenta prijenosa tvari kod sušenja

Vrijednosti Biotova broja ( $Bi_m$ ) i koeficijenta prijenosa mase ( $k_m$ ) izračunate su prema prijedlogu Dincera i Dosta korištenjem procijenjenih parametara Henderson-Pabisova modela pomoću izraza, kao i korištenjem procijenjenih parametara (predloženog) modificiranog Henderson-Pabisova modela (Tablice 3.1-2), a dobivene vrijednosti prikazane su u Tablici 4.11.

**Tablica 4.11** Vrijednosti bezdimenzionalnog  $Bi$ -broja i koeficijenta prijenosa mase ( $k_m$ ) za konvekcijsko sušenje u fluidiziranom sloju [FB] i infracrveno [IR] sušenje krumpira i mrkve pri različitim temperaturama sušenja izračunate iz Henderson-Pabisova i modificiranog Henderson-Pabis modela

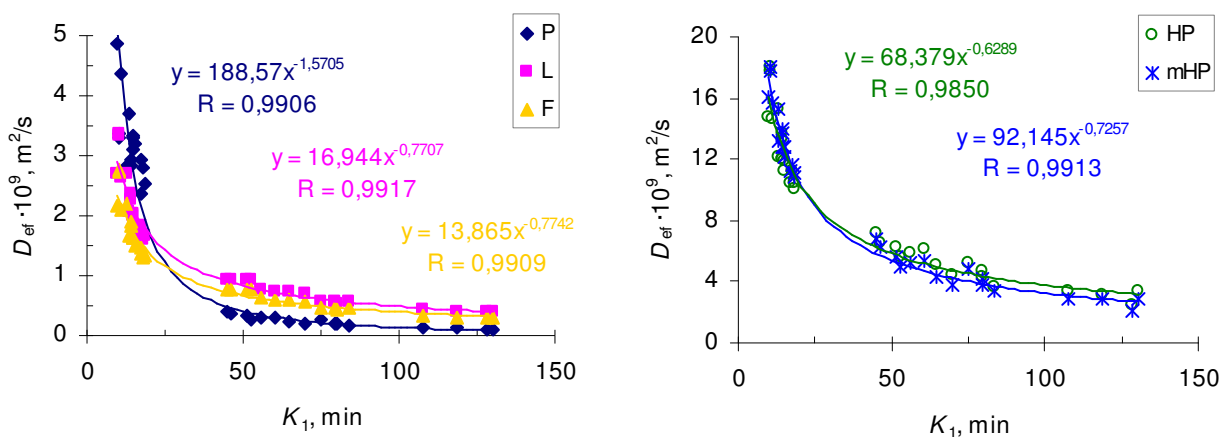
matematički model		Henderson-Pabis		modificirani Henderson-Pabis		
sušenje	$\vartheta$	$Bi$	$k_m \cdot 10^7, \text{ m/s}$	$Bi$	$k_m \cdot 10^7, \text{ m/s}$	
krumpir	FB	60 °C	0,503	21,08	0,520	23,25
		70 °C	0,530	24,71	0,549	27,32
		80 °C	0,540	26,03	0,562	29,20
		90 °C	0,599	35,23	0,623	39,56
	IR	60 °C	0,421	5,58	0,439	2,88
		70 °C	0,452	7,59	0,427	4,08
		80 °C	0,418	10,02	0,419	5,32
		90 °C	0,501	13,42	0,477	6,18
mrkva	FB	60 °C	0,507	21,69	0,521	23,41
		70 °C	0,554	28,09	0,567	30,09
		80 °C	0,594	34,50	0,598	35,08
		90 °C	0,664	47,56	0,663	47,46
	IR	60 °C	0,481	5,53	0,522	2,47
		70 °C	0,428	7,59	0,423	4,00
		80 °C	0,565	10,79	0,591	4,02
		90 °C	0,574	13,98	0,536	5,65

**Tablica 4.12** Vrijednosti statističkog pokazatelja ( $F$  – koeficijent) za utjecaj temperature i načina sušenja na specifične parametre sušenja ( $Bi_m$ ,  $D_{ef}$ ,  $k_m$ ) izračunate iz parametara Henderson-Pabisova i modificiranog Henderson-Pabisova modela

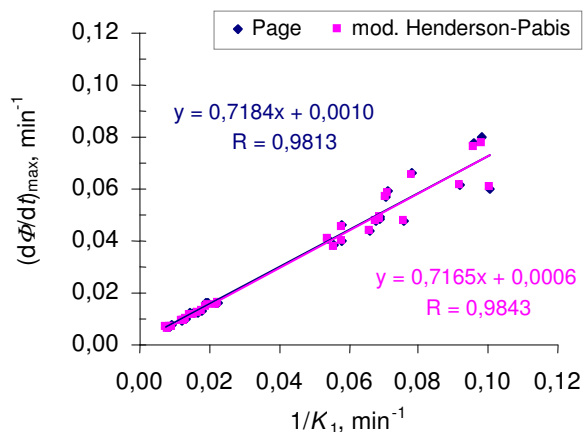
POVRĆE	FAKTOR UTJECAJA	F - koeficijent					
		Henderson-Pabis model			modificirani Henderson-Pabis model		
		$Bi_m$	$D_{ef}$	$k_m$	$Bi_m$	$D_{ef}$	$k_m$
krumpir	način sušenja	7,05 *	645,49 **	1275,58 **	16,98 **	986,74 **	2063,23 **
	temperatura	1,13 ns	33,82 **	89,38 **	1,17 ns	38,63 **	103,39 **
	interakcija <sup>a</sup>	0,08 ns	2,02 ns	8,55 **	0,26 ns	2,45 ns	19,56 **
mrkva	način sušenja	5,27 ns	823,59 **	448,78 **	5,56 ns	1094,83 **	893,08 **
	temperatura	4,61 *	44,78 **	44,07 **	3,15 ns	64,77 **	58,35 **
	interakcija <sup>a</sup>	0,68 ns	7,90 *	11,16 **	1,72 ns	15,16 **	17,53 **

<sup>a</sup> interakcija: način sušenja / temperatura sušenja  
 ns utjecaj faktora nije statistički opravdan  
 \* utjecaj faktora je statistički opravdan uz P = 5%  
 \*\* utjecaj faktora je statistički opravdan uz P = 1%

#### 4.1.6. Pelegova konstanta inicijalne brzine sušenja ( $K_1$ ) u odnosu na koeficijent efektivne difuzije i maksimalnu brzinu sušenja



**Slika 4.24** Odnos koeficijenata efektivne difuzije [ $D_{ef}$ ] i Pelegove konstante inicijalne brzine sušenja [ $K_1$ ] za sve uzorke povrća, oba načina sušenja i sve temperature sušenja (modeli prema kojima je procijenjen  $D_{ef}$  - Fick [F], Lewis [L], Page [P], Henderson-Pabis [HP], modificirani Henderson-Pabis [mHP])



**Slika 4.25** Korelacija između vrijednosti maksimalnih brzina sušenja procijenjenih prema Pageovom, odnosno modificiranom Henderson-Pabis modelu  $[(d\Phi/dt)_{\text{max}}]$  i inicijalne brzine sušenja prema Pelegu  $[1/K_1]$  za sve uzorke povrća, oba načina sušenja i sve temperature sušenja

## 4.2. Rehidracija

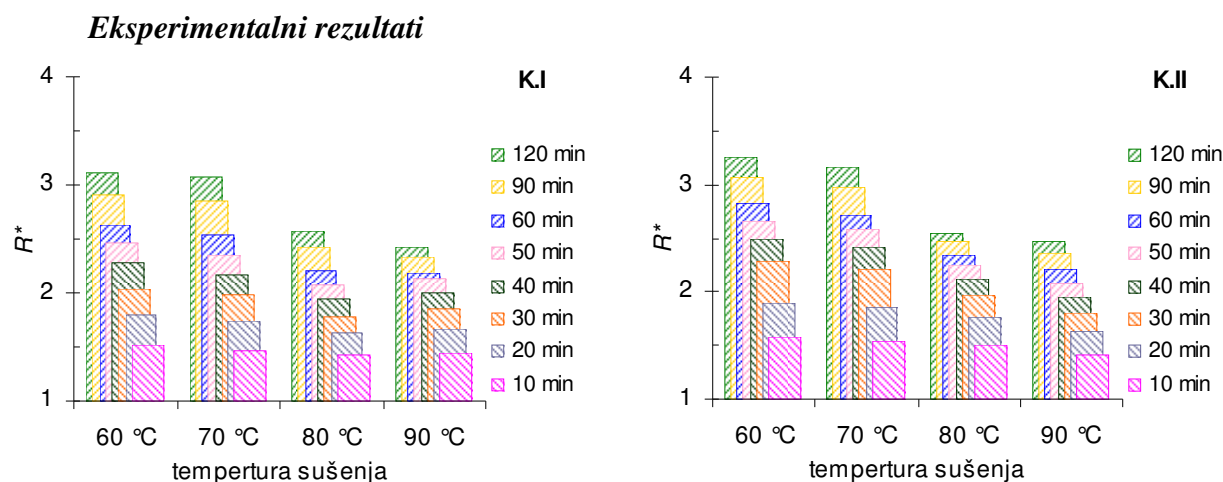
U ovom dijelu poglavlja odvojeno su prikazani rezultati rehidracije sušenih uzoraka krumpira i mrkve. Za svaki prehrambeni materijal najprije su prikazani rezultati za uzorke prethodno sušene konvekcijским načinom u fluidiziranom sloju, a potom rezultati rehidracije za uzorke sušene radijacijskim načinom - infracrvenim sušenjem, na način da iza eksperimentalnih podataka slijede i rezultati njihove aproksimacije odabranim matematičkim modelima. U posebnim podpoglavljima prikazani su utjecaji načina sušenja i temperature sušenja na procijenjene parametre modela i vrijednosti koeficijenta efektivne difuzije vlage tijekom rehidracije.

Rezultati su prikazani kako slijedi:

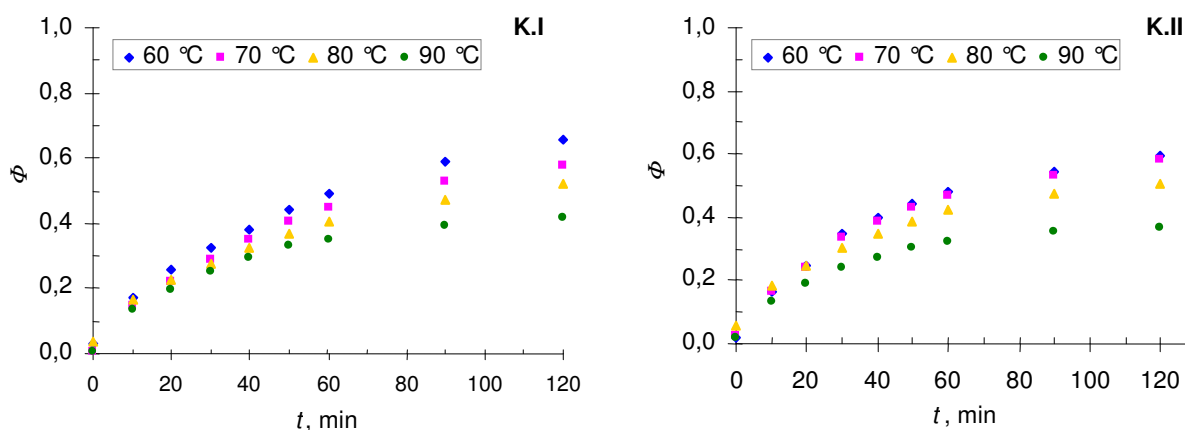
- rehidracija krumpira [K]
  - konvekcijско sušenje u fluidiziranom sloju [FB]
  - infracrveno sušenje [IR]
- sušenje mrkve [M]
  - konvekcijско sušenje u fluidiziranom sloju [FB]
  - infracrveno sušenje [IR]
- utjecaj načina sušenja i temperature sušenja na procijenjene parametre modela
- efektivni difuzijski koeficijent vlage kod rehidracije
- Biotov broj i koeficijent prijenosa mase kod rehidracije

## 4.2.1. Rehidracija krumpira

### 4.2.1.1. Rehidracija krumpira sušenog konvekcijskim načinom u fluidiziranom sloju



**Slika 4.26** Utjecaj vremena rehidracije [(10-120) min] i temperature sušenja [(60, 70, 80, 90) °C] na rehidracione omjere [ $R^*$ ] uzoraka krumpira [K.I, K.II] sušenih konvekcijskim načinom sušenja u fluidiziranom sloju



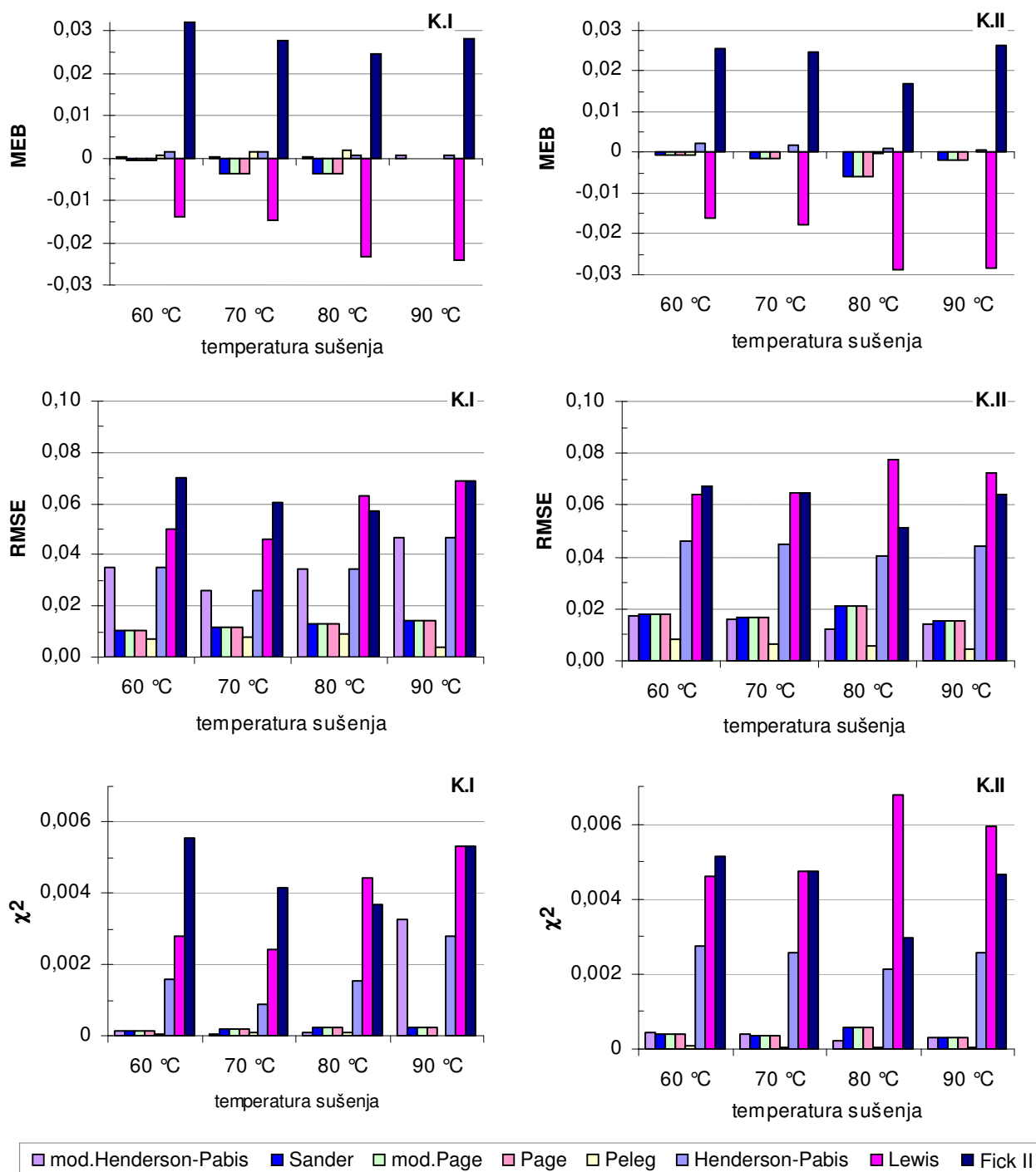
**Slika 4.27** Eksperimentalni podaci rehidracije uzoraka krumpira [K.I, K.II] prethodno sušenih konvekcijskim načinom sušenja u fluidiziranom sloju pri različitim temperaturama sušenja [(60, 70, 80, 90) °C] - ovisnost bezdimenzionalne vlažnosti uzoraka [ $\Phi$ ] o vremenu rehidracije [ $t$ ]

Regresijskom analizom prikazanih eksperimentalnih rezultata procijenjeni su parametri kinetičkih matematičkih modela (*Tablica 4.13*), a slaganje eksperimentalnih i, prema modelima, izračunatih vrijednosti određeno je pomoću statističkih parametara (*Slike 4.28-29*).

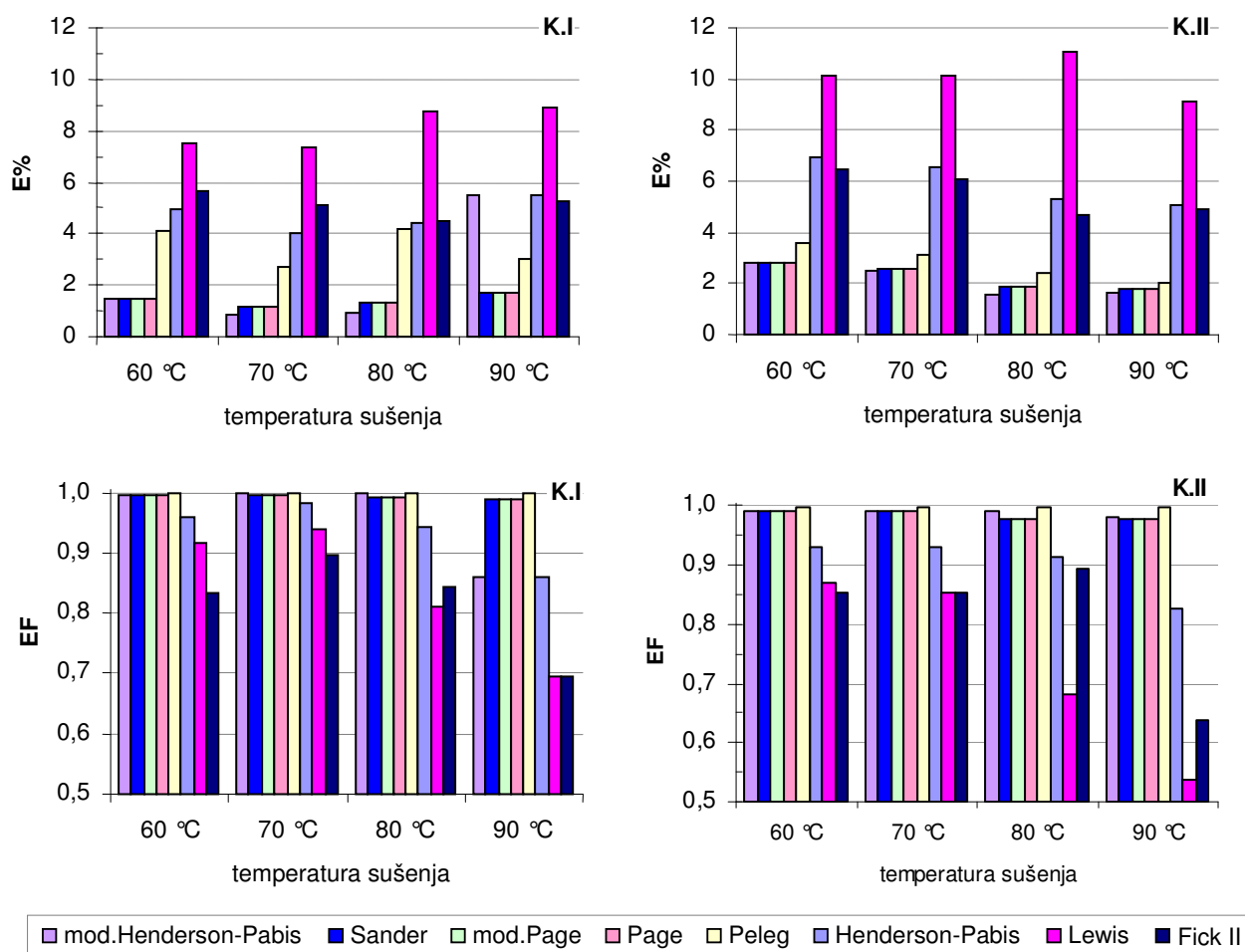
*Rezultati primjene matematičkih modela***Tablica 4.13** Procijenjeni parametri matematičkih modela te koeficijenti korelacije (R) i ukupno kvadratno odstupanje (FL) između eksperimentalnih i izračunatih vrijednosti za rehidraciju uzoraka krumpira (uzorci K.I i K.II), koji su sušeni konvekcijски u fluidiziranom sloju

temperatura sušenja	uzorak: K.I				uzorak: K.II			
	60 °C	70 °C	80 °C	90 °C	60 °C	70 °C	80 °C	90 °C
parametar $K_F, \text{min}^{-1}$	<b>Fick</b>							
R	0,0071	0,0056	0,0045	0,0031	0,0064	0,0061	0,0048	0,0024
FL	0,9466	0,9136	0,9175	0,8337	0,9240	0,9244	0,9277	0,7989
parametar $K_L, \text{min}^{-1}$	<b>Lewis</b>							
R	0,0110	0,0093	0,0081	0,0065	0,0104	0,0100	0,0085	0,0057
FL	0,9690	0,9576	0,9001	0,8329	0,9322	0,9241	0,8260	0,7337
parametri $k, \text{min}^{-n}$	<b>Page</b>							
$n$	0,0348	0,0349	0,0469	0,0528	0,0481	0,0491	0,0638	0,0598
R	0,7181	0,6795	0,5790	0,4998	0,6248	0,6114	0,5130	0,4415
FL	0,9980	0,9982	0,9957	0,9937	0,9949	0,9950	0,9884	0,9897
parametri $t_k, \text{min}$	<b>Sander</b>							
$n$	107,59	139,61	197,52	359,15	128,79	138,39	213,96	589,77
R	0,7181	0,6795	0,5790	0,4998	0,6248	0,6114	0,5130	0,4415
FL	0,9980	0,9982	0,9957	0,9937	0,9949	0,9950	0,9884	0,9897
parametri $k', \text{min}^{-1}$	<b>modificirani Page</b>							
$n'$	0,0093	0,0072	0,0051	0,0028	0,0078	0,0072	0,0047	0,0017
R	0,7181	0,6795	0,5791	0,4999	0,6248	0,6114	0,5131	0,4422
FL	0,9980	0,9982	0,9957	0,9937	0,9949	0,9950	0,9884	0,9897
parametri $K_1, \text{min}$	<b>Peleg</b>							
$K_2$	69,8774	68,4324	73,5922	64,4058	56,9481	57,8040	72,3835	67,5539
R	1,0195	1,1829	1,4479	1,8954	1,2585	1,2990	1,6129	2,2587
FL	0,9992	0,9992	0,9979	0,9995	0,9989	0,9993	0,9992	0,9991
parametri $G$	<b>Henderson-Pabis</b>							
$S, \text{min}^{-1}$	0,9201	0,9289	0,8970	0,9032	0,9086	0,9032	0,8699	0,8933
R	0,0093	0,0079	0,0062	0,0047	0,0085	0,0080	0,0060	0,0038
FL	0,9904	0,9789	0,9710	0,9275	0,9651	0,9647	0,9552	0,9087
parametri $G'$	<b>modificirani Henderson-Pabis</b>							
$S', \text{min}^{-N}$	0,9693	0,9956	0,9670	0,9969	0,9914	0,9848	0,9498	0,9839
$N$	0,0269	0,0336	0,0351	0,0515	0,0453	0,0440	0,0431	0,0519
R	0,7671	0,6863	0,6316	0,5042	0,6356	0,6311	0,5817	0,4647
FL	0,9996	0,9982	0,9988	0,9937	0,9951	0,9955	0,9963	0,9911
	0,0003	0,0009	0,0005	0,0018	0,0028	0,0023	0,0013	0,0018

*Statistički pokazatelji uspješnosti aproksimacije*



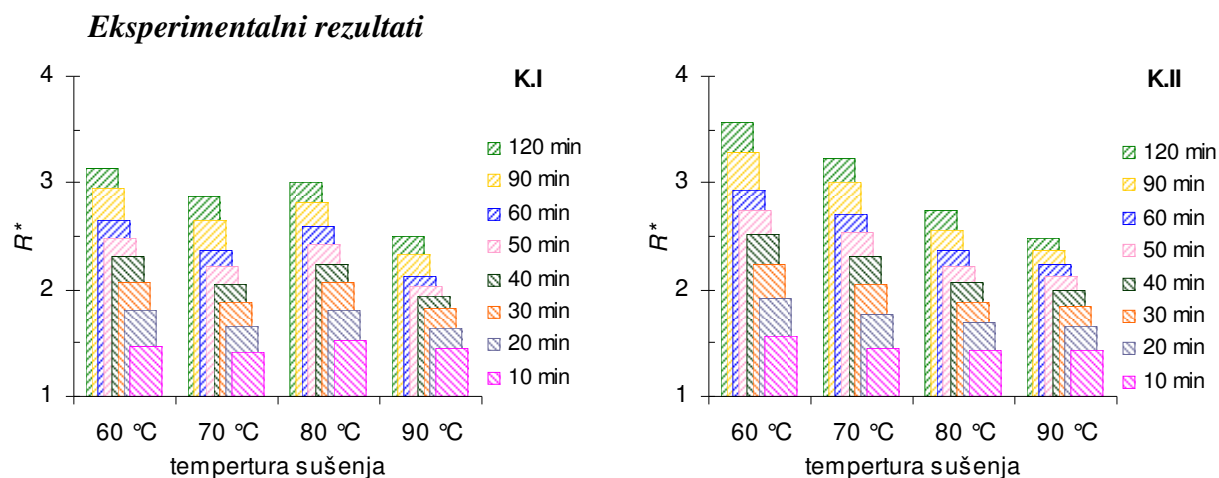
**Slika 4.28** Srednje apsolutno odstupanje [MEB], srednje odstupanje [RMSE] i reducirani chi-kvadrat [ $\chi^2$ ] aproksimacije eksperimentalnih podataka s odabranim modelima za rehidraciju uzoraka krumpira [K.I, K.II] sušenih konvekcijskim načinom u fluidiziranom sloju pri različitim temperaturama sušenja



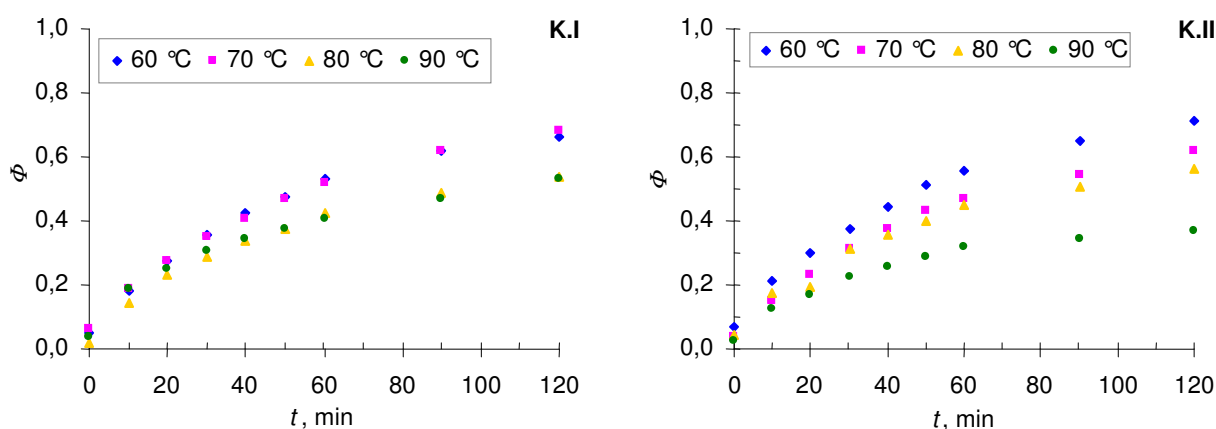
**Slika 4.29** Srednja relativna pogreška [E%] i efikasnost odabranih modela [EF] u predviđanju kinetike rehidracije krumpira (uzorci [K.I, K.II]) sušenog pri različitim temperaturama sušenja (sušenje je provedeno konvekcijskim načinom u fluidiziranom sloju)



## 4.2.1.2. Rehidracija krumpira sušenog infracrvenim sušenjem



**Slika 4.30** Utjecaj vremena rehidracije [(10-120) min] i temperature sušenja [(60, 70, 80, 90) °C] na rehidracione omjere [ $R^*$ ] uzoraka krumpira [K.I, K.II] sušenih radijacijskim načinom sušenja



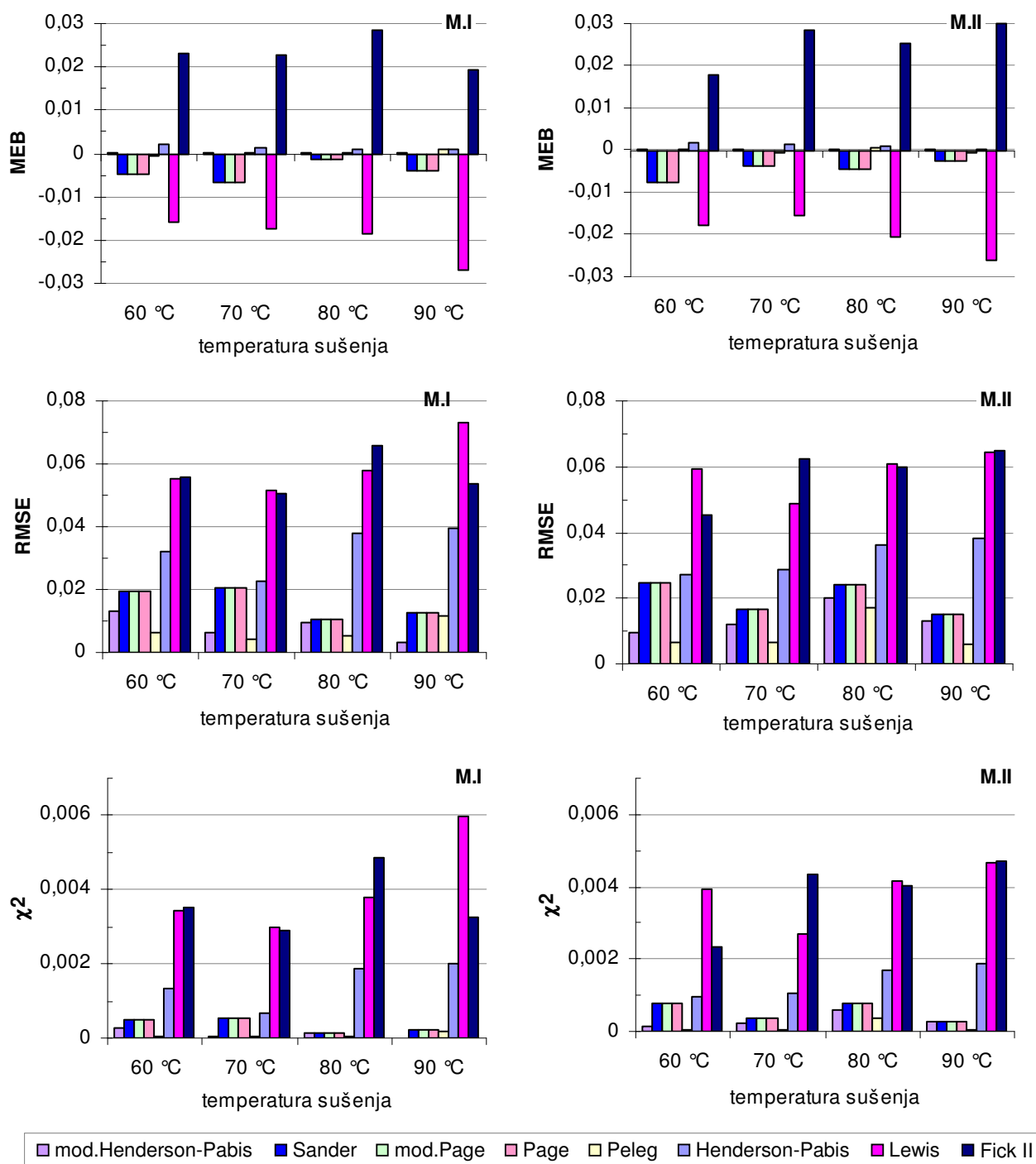
**Slika 4.31** Eksperimentalni podaci rehidracije uzoraka krumpira [K.I, K.II] prethodno sušenih infracrvenim sušenjem pri različitim temperaturama sušenja [(60, 70, 80, 90) °C] - ovisnost bezdimenzionalne vlažnosti uzoraka [ $\phi$ ] o vremenu rehidracije [ $t$ ]

Regresijskom analizom prikazanih eksperimentalnih rezultata procijenjeni su parametri kinetičkih matematičkih modela (*Tablica 4.14*), a slaganje eksperimentalnih i, prema modelima, izračunatih vrijednosti određeno je pomoću statističkih parametara (*Slike 4.32-33*).

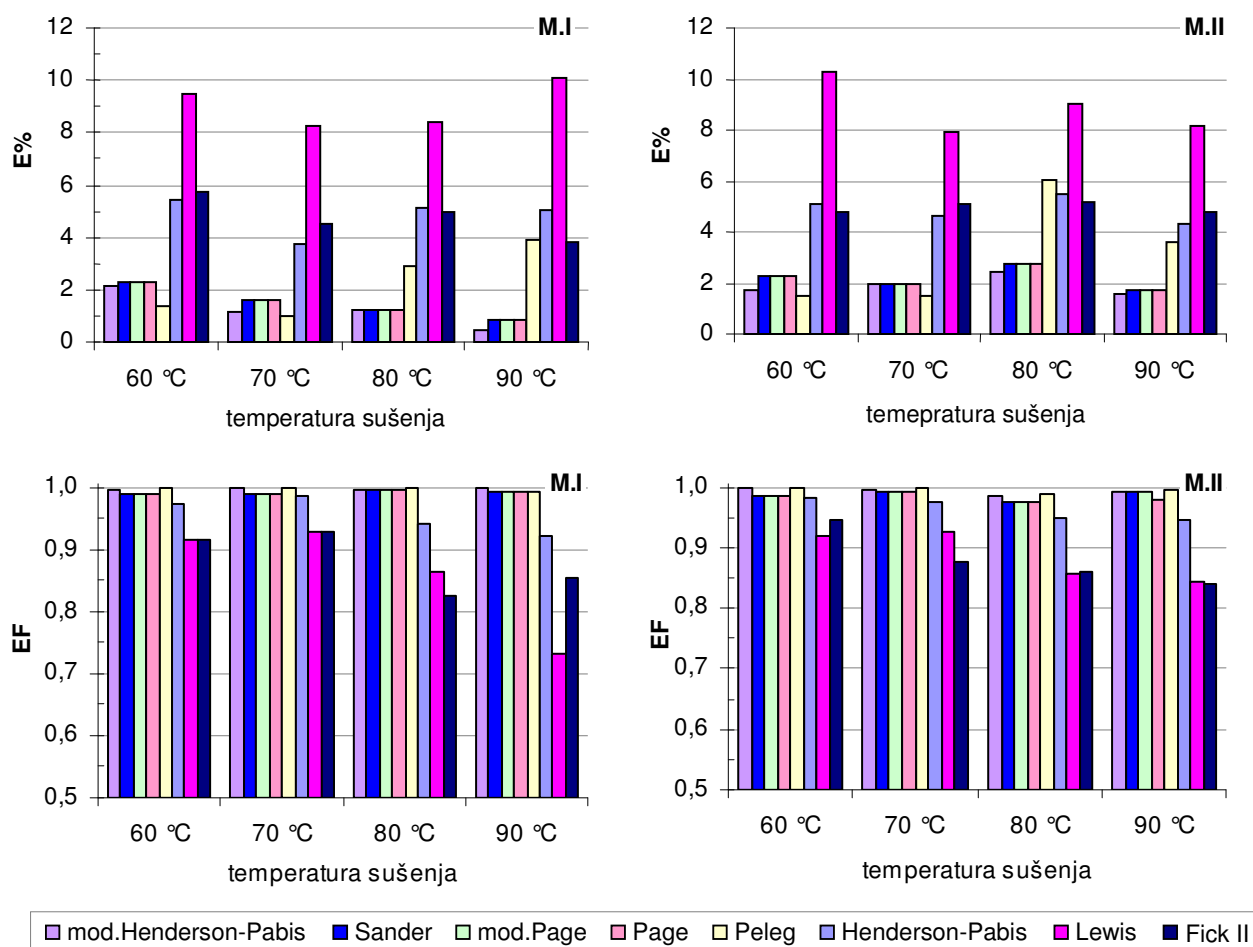
*Rezultati primjene matematičkih modela***Tablica 4.14** Procijenjeni parametri matematičkih modela te koeficijenti korelacije (R) i ukupno kvadratno odstupanje (FL) između eksperimentalnih i izračunatih vrijednosti za rehidraciju uzoraka krumpira (uzorci K.I i K.II), koji su sušeni radijacijskim načinom sušenja

temperatura sušenja	uzorak: K.I				uzorak: K.II			
	60 °C	70 °C	80 °C	90 °C	60 °C	70 °C	80 °C	90 °C
Parametar	<b>Fick</b>							
$K_F, \text{min}^{-1}$	0,0080	0,0079	0,0049	0,0047	0,0092	0,0063	0,0054	0,0022
R	0,9563	0,9638	0,9074	0,9246	0,9726	0,9369	0,9271	0,7901
FL	0,0281	0,0231	0,0388	0,0260	0,0186	0,0348	0,0322	0,0376
Parametar	<b>Lewis</b>							
$K_L, \text{min}^{-1}$	0,0122	0,0120	0,0085	0,0084	0,0136	0,0101	0,0091	0,0054
R	0,9570	0,9627	0,9286	0,8559	0,9531	0,9615	0,9248	0,7921
FL	0,0276	0,0238	0,0302	0,0478	0,0316	0,0215	0,0332	0,0373
Parametri	<b>Page</b>							
$k, \text{min}^{-n}$	0,0426	0,0385	0,0416	0,0609	0,0477	0,0337	0,0411	0,0482
$N$	0,6894	0,7123	0,6172	0,5225	0,6855	0,7066	0,6352	0,4846
R	0,9949	0,9941	0,9977	0,9959	0,9919	0,9956	0,9883	0,9899
FL	0,0034	0,0038	0,0010	0,0015	0,0055	0,0025	0,0053	0,0020
Parametri	<b>Sander</b>							
$t_k, \text{min}$	97,40	96,85	172,90	212,17	84,66	121,19	151,94	521,55
$N$	0,6894	0,7123	0,6172	0,5225	0,6855	0,7066	0,6352	0,4846
R	0,9949	0,9941	0,9977	0,9959	0,9919	0,9956	0,9883	0,9899
FL	0,0034	0,0038	0,0010	0,0015	0,0055	0,0025	0,0053	0,0020
Parametri	<b>modificirani Page</b>							
$k', \text{min}^{-1}$	0,0103	0,0103	0,0058	0,0047	0,0118	0,0083	0,0066	0,0019
$n'$	0,6894	0,7123	0,6173	0,5225	0,6855	0,7066	0,6352	0,4851
R	0,9949	0,9941	0,9977	0,9959	0,9919	0,9957	0,9883	0,9899
FL	0,0034	0,0038	0,0010	0,0015	0,0055	0,0025	0,0053	0,0020
Parametri	<b>Peleg</b>							
$K_1, \text{min}$	64,9134	73,8968	70,2549	66,3084	64,0554	77,8644	77,0665	88,4712
$K_2$	1,0603	0,9828	1,3560	1,5723	1,0178	1,0755	1,2591	2,1670
R	0,9994	0,9997	0,9994	0,9966	0,9995	0,9994	0,9943	0,9983
FL	0,0004	0,0002	0,0003	0,0012	0,0004	0,0004	0,0026	0,0003
Parametri	<b>Henderson-Pabis</b>							
$G$	0,9041	0,9026	0,9129	0,8794	0,8863	0,9191	0,9023	0,9037
$S, \text{min}^{-1}$	0,0101	0,0099	0,0068	0,0061	0,0110	0,0085	0,0072	0,0038
R	0,9858	0,9930	0,9700	0,9600	0,9902	0,9868	0,9739	0,9326
FL	0,0093	0,0046	0,0130	0,0140	0,0067	0,0074	0,0118	0,0130
Parametri	<b>modificirani Henderson-Pabis</b>							
$G'$	0,9588	0,9436	0,9873	0,9637	0,9337	0,9683	0,9611	0,9793
$S', \text{min}^{-N}$	0,0315	0,0244	0,0374	0,0456	0,0297	0,0258	0,0294	0,0391
$N$	0,7465	0,8005	0,6366	0,5736	0,7767	0,7575	0,6973	0,5199
R	0,9977	0,9995	0,9981	0,9997	0,9988	0,9976	0,9920	0,9922
FL	0,0015	0,0003	0,0008	0,0001	0,0008	0,0014	0,0037	0,0016

*Statistički pokazatelji uspješnosti aproksimacije*



**Slika 4.32** Srednje apsolutno odstupanje [MEB], srednje odstupanje [RMSE] i reducirani chi-kvadrat [ $\chi^2$ ] aproksimacije eksperimentalnih podataka s odabranim modelima za rehidraciju uzoraka krumpira [K.I, K.II] sušenih infracrvenim sušenjem pri različitim temperaturama sušenja

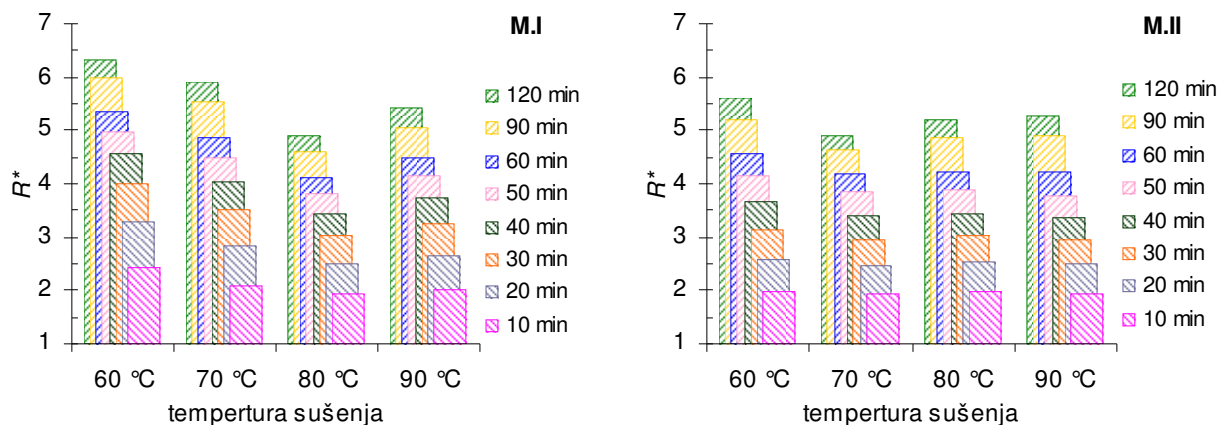


**Slika 4.33** Srednja relativna pogreška [E%] i efikasnost odabranih modela [EF] u predviđanju kinetike rehidratacije krumpira (uzorci [K.I, K.II]) za različite temperature sušenja (sušenje je provedeno radijacijskim prijenosom topline – infracrveno sušenje)

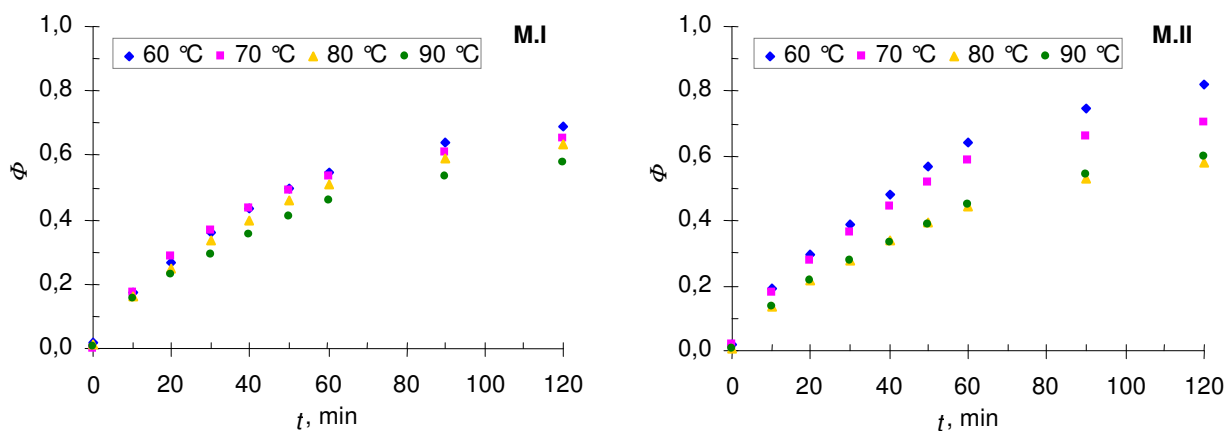
## 4.2.2. Rehidracija mrkve

### 4.2.2.1. Rehidracija mrkve sušene konvekcijski u fluidiziranom sloju

#### *Eksperimentalni rezultati*



**Slika 4.34** Utjecaj vremena rehidracije [(10-120) min] i temperature sušenja [(60, 70, 80, 90) °C] na rehidracione omjere [ $R^*$ ] uzoraka mrkve [M.I, M.II] sušenih konvekcijskim načinom sušenja u fluidiziranom sloju



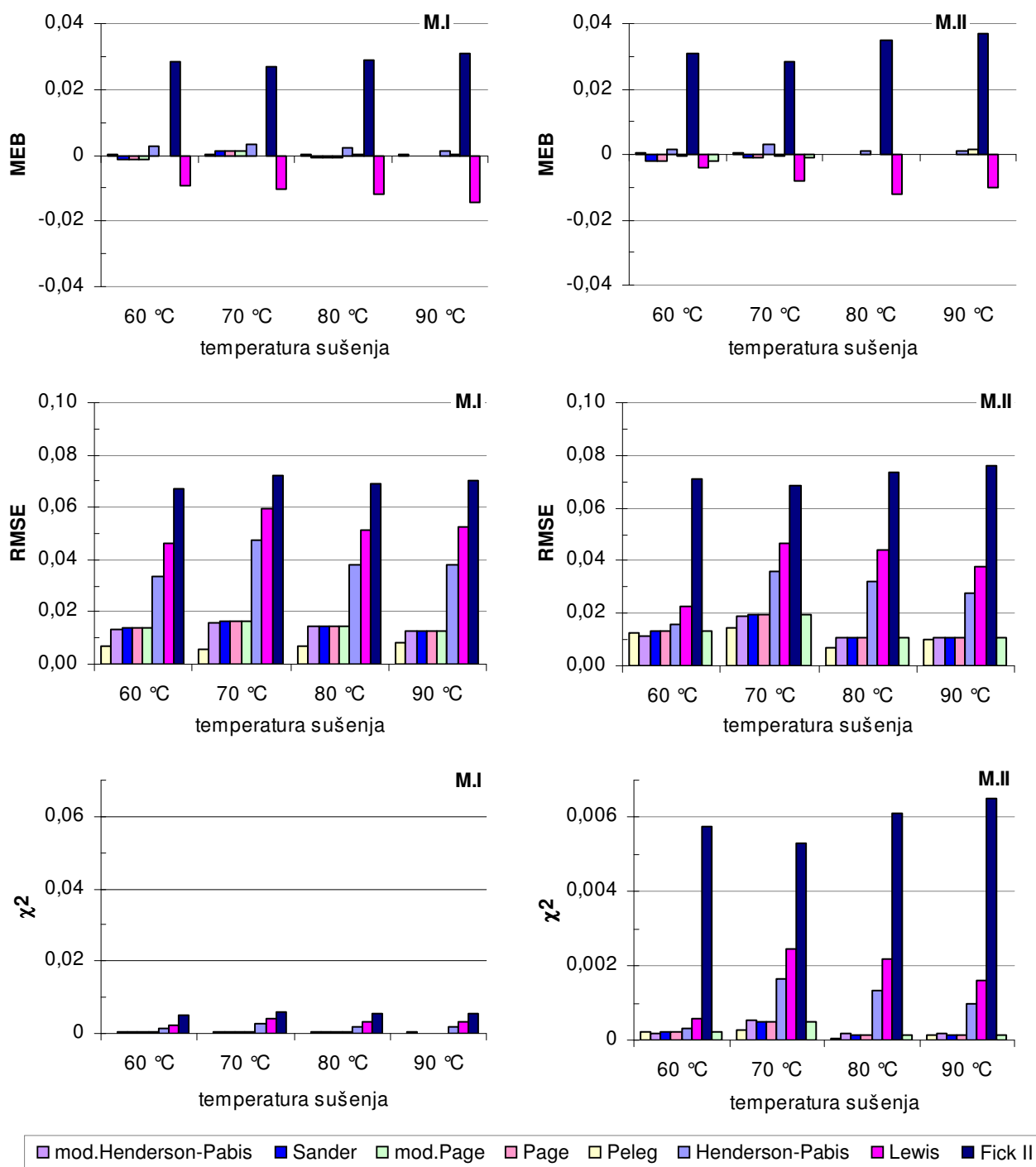
**Slika 4.35** Eksperimentalni podaci rehidracije uzoraka mrkve [M.I, M.II] prethodno sušenih konvekcijskim sušenjem u fluidiziranom sloju pri različitim temperaturama sušenja [(60, 70, 80, 90) °C] - ovisnost bezdimenzionalne vlažnosti uzoraka [ $\Phi$ ] o vremenu rehidracije [ $t$ ]

Regresijskom analizom prikazanih eksperimentalnih rezultata procijenjeni su parametri kinetičkih matematičkih modela (*Tablica 4.15*), a slaganje eksperimentalnih i, prema modelima, izračunatih vrijednosti određeno je pomoću statističkih parametara (*Slike 4.36-37*).

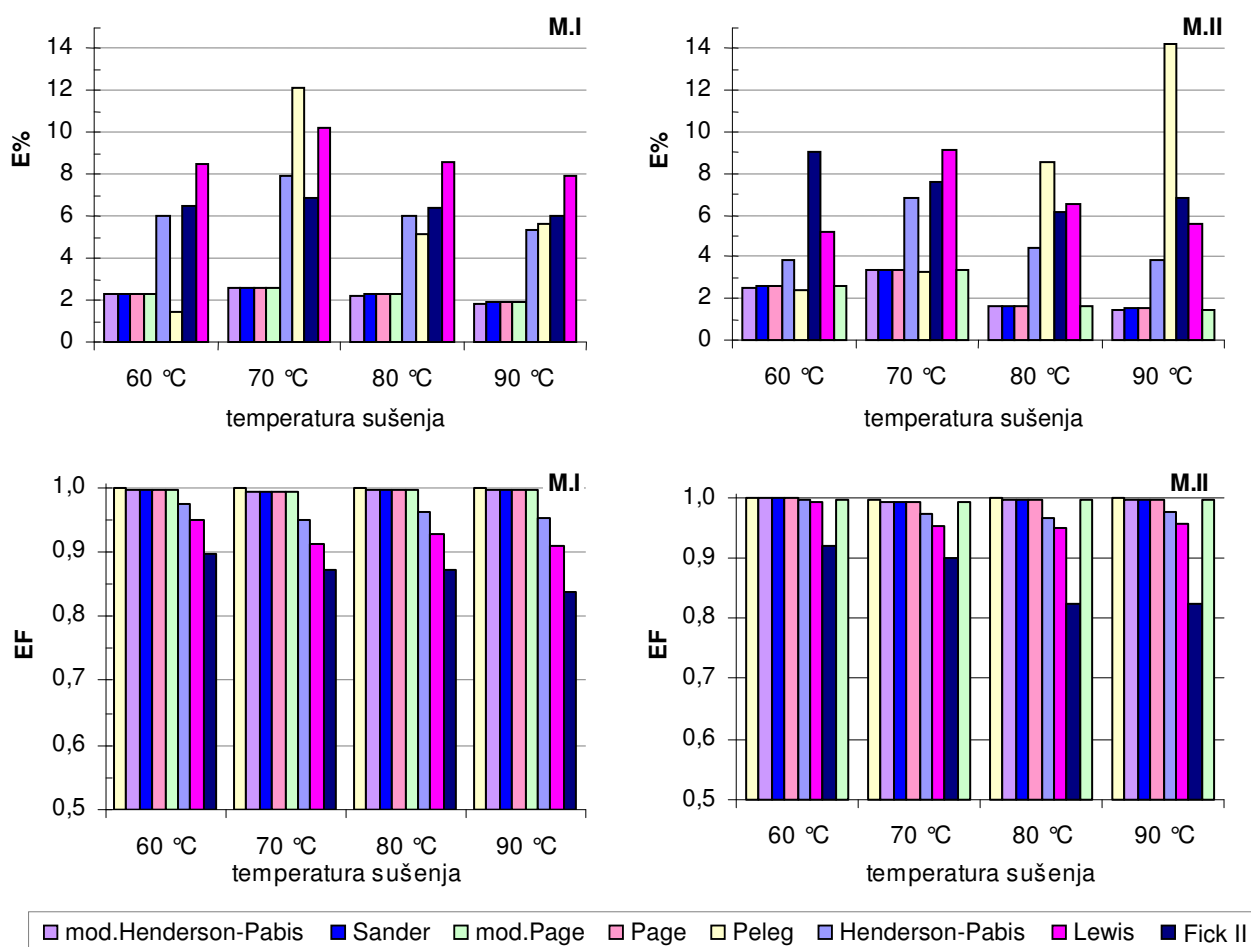
*Rezultati primjene matematičkih modela***Tablica 4.15** Procijenjeni parametri matematičkih modela te koeficijenti korelacije (R) i ukupno kvadratno odstupanje (FL) između eksperimentalnih i izračunatih vrijednosti za rehidraciju uzoraka mrkve (uzorci M.I i M.II), koji su sušeni konvekcijski u fluidiziranom sloju

temperatura sušenja	uzorak: M.I				uzorak: M.II			
	60 °C	70 °C	80 °C	90 °C	60 °C	70 °C	80 °C	90 °C
parametar $K_F, \text{min}^{-1}$	<b>Fick</b>							
R	0,0086	0,0081	0,0072	0,0057	0,0118	0,0093	0,0055	0,0056
FL	0,9464	0,9331	0,9334	0,9151	0,9579	0,9478	0,9076	0,9079
	0,0406	0,0467	0,0425	0,0443	0,0458	0,0424	0,0487	0,0521
parametar $K_L, \text{min}^{-1}$	<b>Lewis</b>							
R	0,0128	0,0123	0,0112	0,0095	0,0164	0,0136	0,0091	0,0093
FL	0,9750	0,9547	0,9631	0,9536	0,9959	0,9761	0,9680	0,9782
	0,0192	0,0319	0,0239	0,0247	0,0045	0,0197	0,0174	0,0128
parametri $k, \text{min}^{-n}$	<b>Page</b>							
$n$	0,0367	0,0476	0,0383	0,0371	0,0253	0,0371	0,0297	0,0256
R	0,7373	0,6644	0,6968	0,6692	0,8894	0,7483	0,7145	0,7554
FL	0,9977	0,9967	0,9971	0,9975	0,9986	0,9959	0,9981	0,9984
	0,0018	0,0024	0,0019	0,0014	0,0016	0,0034	0,0011	0,0010
parametri $t_k, \text{min}$	<b>Sander</b>							
$n$	88,32	97,84	108,01	137,43	62,57	81,63	136,99	128,18
R	0,7373	0,6644	0,6968	0,6692	0,8894	0,7483	0,7145	0,7554
FL	0,9977	0,9967	0,9971	0,9975	0,9986	0,9959	0,9981	0,9984
	0,0018	0,0024	0,0019	0,0014	0,0016	0,0034	0,0011	0,0010
parametri $k', \text{min}^{-1}$	<b>modificirani Page</b>							
$n'$	0,0113	0,0102	0,0093	0,0073	0,0160	0,0123	0,0073	0,0078
R	0,7373	0,6644	0,6969	0,6692	0,8894	0,7483	0,7146	0,7554
FL	0,9977	0,9967	0,9971	0,9975	0,9986	0,9959	0,9981	0,9984
	0,0018	0,0024	0,0019	0,0014	0,0016	0,0034	0,0011	0,0010
parametri $K_1, \text{min}$	<b>Peleg</b>							
$K_2$	56,6923	46,6821	57,9967	65,5062	53,9661	53,9212	74,1472	74,1203
R	0,9959	1,1243	1,0969	1,1968	0,7804	0,9741	1,1218	1,0416
FL	0,9995	0,9996	0,9993	0,9988	0,9987	0,9978	0,9992	0,9985
	0,0004	0,0003	0,0005	0,0006	0,0015	0,0019	0,0004	0,0009
parametri $G$	<b>Henderson-Pabis</b>							
$S, \text{min}^{-1}$	0,9315	0,9227	0,9265	0,9262	0,9631	0,9342	0,9392	0,9485
R	0,0113	0,0106	0,0096	0,0080	0,0155	0,0121	0,0080	0,0083
FL	0,9868	0,9713	0,9802	0,9761	0,9981	0,9860	0,9831	0,9882
	0,0102	0,0205	0,0129	0,0129	0,0022	0,0116	0,0092	0,0069
parametri $G'$	<b>modificirani Henderson-Pabis</b>							
$S', \text{min}^{-N}$	0,9879	1,0070	0,9929	0,9968	0,9810	0,9887	0,9982	0,9988
$N$	0,0338	0,0497	0,0364	0,0361	0,0220	0,0344	0,0293	0,0253
R	0,7535	0,6563	0,7066	0,6740	0,9178	0,7630	0,7175	0,7574
FL	0,9979	0,9968	0,9972	0,9975	0,9989	0,9960	0,9981	0,9984
	0,0016	0,0023	0,0018	0,0014	0,0012	0,0033	0,0011	0,0010

*Statistički pokazatelji uspješnosti aproksimacije*



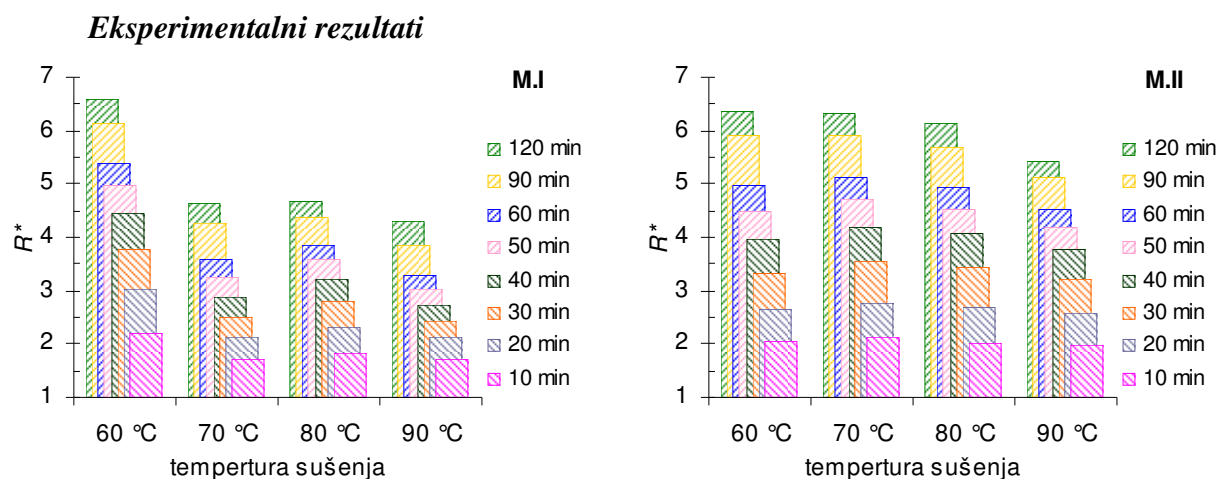
**Slika 4.36** Srednje apsolutno odstupanje [MEB], srednje odstupanje [RMSE] i reducirani chi-kvadrat [ $\chi^2$ ] aproksimacije eksperimentalnih podataka s odabranim modelima za rehidraciju uzoraka mrkve [M.I, M.II] sušenih konvekcijskim načinom u fluidiziranom sloju pri različitim temperaturama sušenja



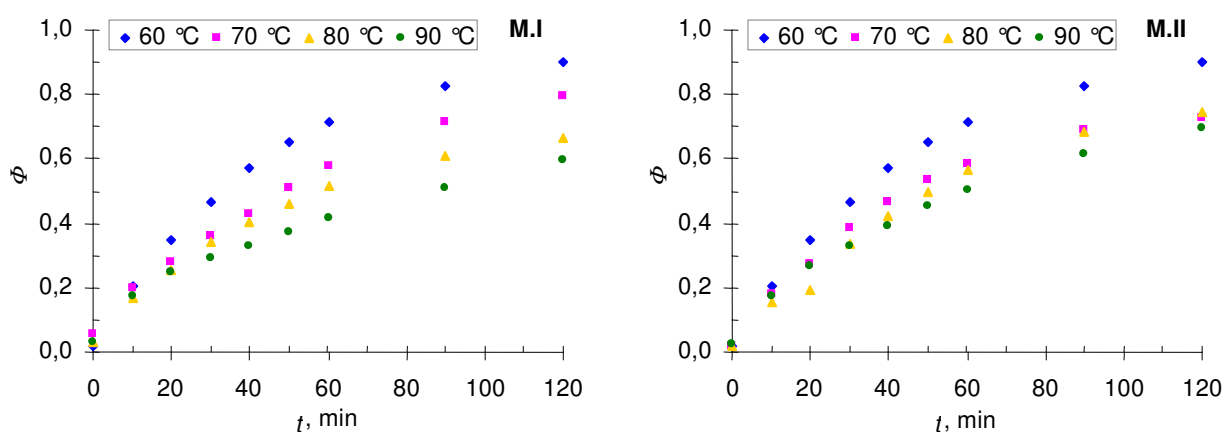
**Slika 4.37** Srednja relativna pogreška [E%] i efikasnost odabranih modela [EF] u predviđanju kinetike rehidracije mrkve (uzorci [M.I, M.II]) sušene pri različitim temperaturama sušenja (sušenja je provedeno konvekcijskim načinom u fluidiziranom sloju)



## 4.2.2.2. Rehidracija mrkve sušene infracrvenim sušenjem



**Slika 4.38** Utjecaj vremena rehidracije [(10-120) min] i temperature sušenja [(60, 70, 80, 90) °C] na rehidracione omjere [ $R^*$ ] uzoraka mrkve [M.I, M.II] sušenih radijacijskim načinom sušenja



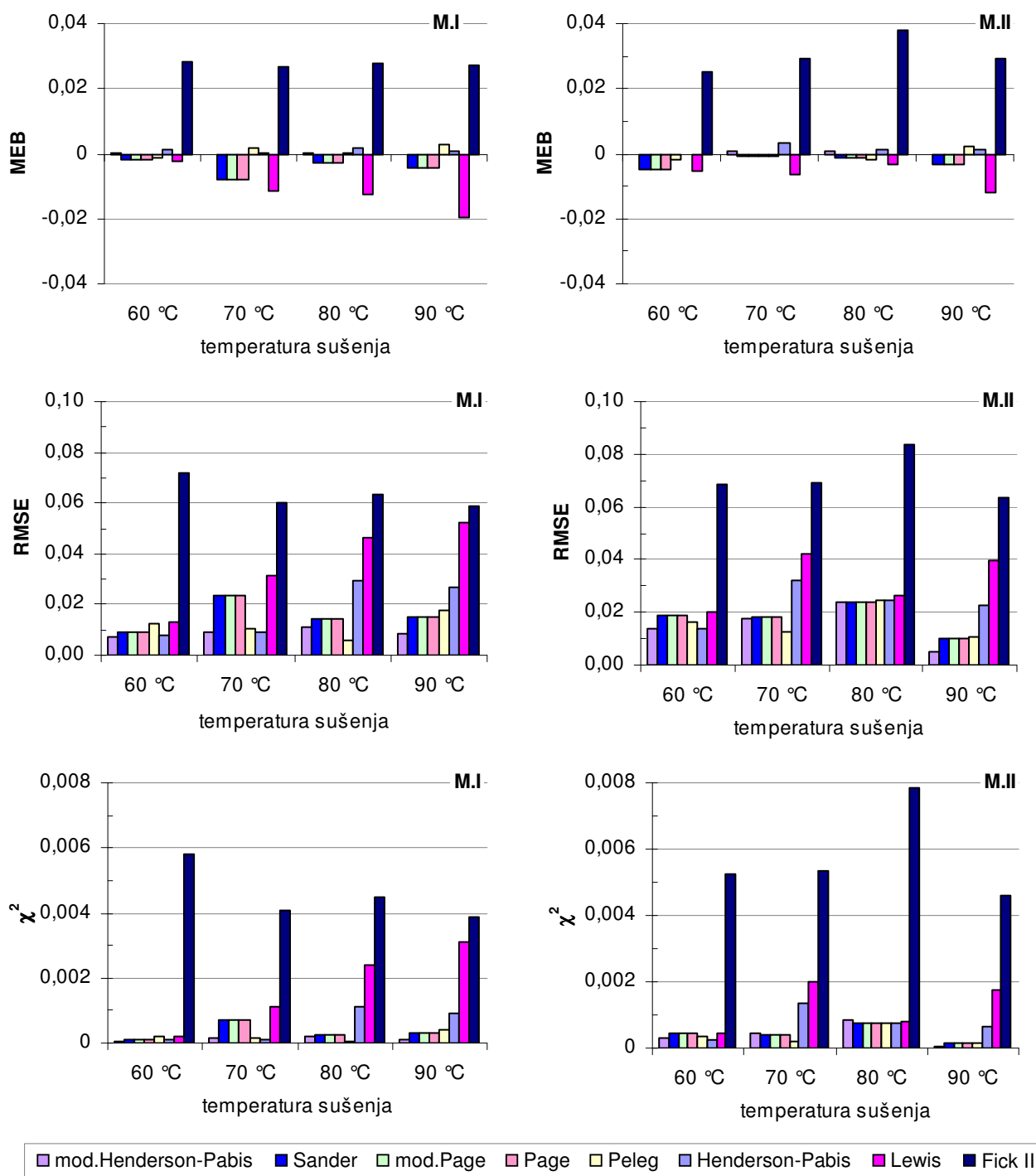
**Slika 4.39** Eksperimentalni podaci rehidracije uzoraka mrkve [M.I, M.II] prethodno sušenih infracrvenim sušenjem pri različitim temperaturama sušenja [(60, 70, 80, 90) °C] - ovisnost bezdimenzionalne vlažnosti uzoraka [ $\Phi$ ] o vremenu rehidracije [ $t$ ]

Regresijskom analizom prikazanih eksperimentalnih rezultata procijenjeni su parametri kinetičkih matematičkih modela (*Tablica 4.16*), a slaganje eksperimentalnih i, prema modelima, izračunatih vrijednosti određeno je pomoću statističkih parametara (*Slike 4.40-41*).

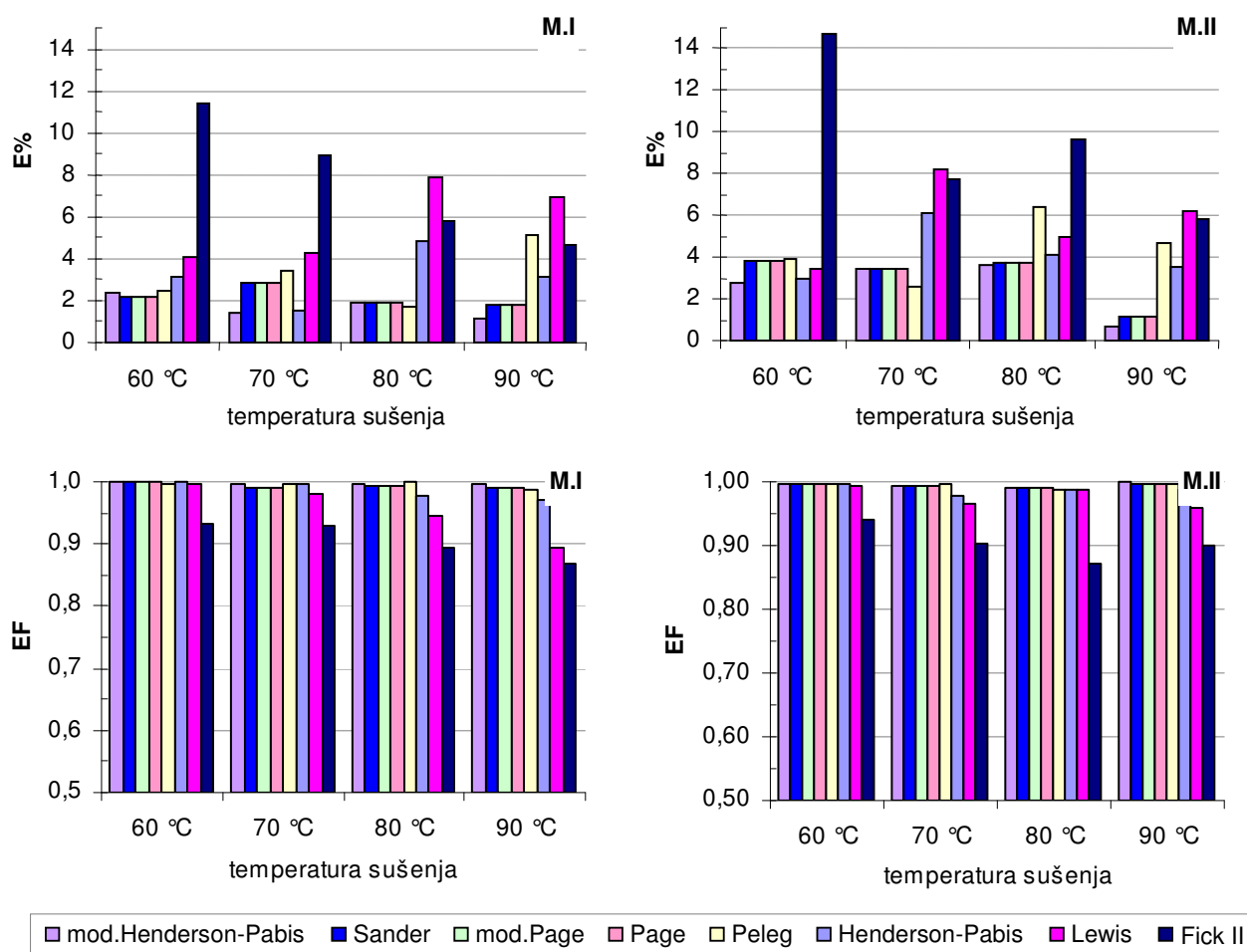
*Rezultati primjene matematičkih modela***Tablica 4.16** Procijenjeni parametri matematičkih modela te koeficijenti korelacije (R) i Ukupno kvadratno odstupanje (FL) između eksperimentalnih i izračunatih vrijednosti za rehidraciju uzoraka mrkve (uzorci M.I i M.II), koji su sušeni radijacijskim načinom sušenja

temperatura sušenja	uzorak: M.I				uzorak: M.II			
	60 °C	70 °C	80 °C	90 °C	60 °C	70 °C	80 °C	90 °C
parametar $K_F, \text{min}^{-1}$	<b>Fick</b>							
R	0,0157	0,0101	0,0076	0,0054	0,0165	0,0099	0,0089	0,0077
FL	0,9653	0,9646	0,9463	0,9323	0,9691	0,9511	0,9332	0,9480
	0,0465	0,0324	0,0360	0,0309	0,0420	0,0427	0,0626	0,0366
parametar $K_L, \text{min}^{-1}$	<b>Lewis</b>							
R	0,0209	0,0144	0,0117	0,0090	0,0217	0,0143	0,0130	0,0117
FL	0,9989	0,9905	0,9716	0,9459	0,9974	0,9822	0,9933	0,9803
	0,0015	0,0088	0,0193	0,0249	0,0036	0,0158	0,0064	0,0141
parametri $k, \text{min}^{-n}$	<b>Page</b>							
R	0,0258	0,0241	0,0349	0,0373	0,0254	0,0347	0,0175	0,0311
FL	0,9440	0,8711	0,7298	0,6569	0,9576	0,7767	0,9260	0,7600
	0,9995	0,9947	0,9974	0,9957	0,9977	0,9967	0,9946	0,9987
	0,0007	0,0050	0,0018	0,0020	0,0032	0,0029	0,0052	0,0009
parametri $t_k, \text{min}$	<b>Sander</b>							
R	48,141	71,990	99,299	149,316	46,27	75,84	79,01	96,36
FL	0,9440	0,8711	0,7298	0,6569	0,9577	0,7767	0,9260	0,7600
	0,9995	0,9947	0,9974	0,9957	0,9977	0,9967	0,9946	0,9987
	0,0007	0,0050	0,0018	0,0020	0,0032	0,0029	0,0052	0,0009
parametri $k', \text{min}^{-n'}$	<b>modificirani Page</b>							
R	0,0208	0,0139	0,0101	0,0067	0,0216	0,0132	0,0127	0,0104
FL	0,9440	0,8711	0,7298	0,6569	0,9577	0,7767	0,9260	0,7600
	0,9995	0,9947	0,9974	0,9957	0,9977	0,9967	0,9946	0,9987
	0,0007	0,0050	0,0018	0,0020	0,0032	0,0029	0,0052	0,0009
parametri $K_1, \text{min}$	<b>Peleg</b>							
R	43,1256	72,2503	65,5560	80,5513	45,6170	53,2084	71,5406	66,8557
FL	0,7571	0,7249	1,0103	1,1601	0,7335	0,9319	0,7446	0,9367
	0,9990	0,9989	0,9996	0,9940	0,9982	0,9984	0,9944	0,9986
	0,0013	0,0010	0,0003	0,0028	0,0025	0,0015	0,0054	0,0010
parametri $G$	<b>Henderson-Pabis</b>							
R	0,9761	0,9350	0,9244	0,9102	0,9657	0,9407	0,9766	0,9314
FL	0,0202	0,0130	0,0101	0,0073	0,0207	0,0129	0,0125	0,0103
	0,9996	0,9991	0,9887	0,9862	0,9987	0,9895	0,9944	0,9937
	0,0006	0,0008	0,0077	0,0065	0,0018	0,0094	0,0054	0,0046
parametri $G'$	<b>modificirani Henderson-Pabis</b>							
R	0,9828	0,9382	0,9750	0,9641	0,9634	0,9880	0,9873	0,9742
FL	0,0230	0,0139	0,0288	0,0265	0,0198	0,0320	0,0157	0,0251
	0,9681	0,9845	0,7668	0,7218	1,0111	0,7924	0,9482	0,8020
	0,9997	0,9992	0,9984	0,9985	0,9987	0,9969	0,9948	0,9997
	0,0004	0,0008	0,0011	0,0007	0,0018	0,0028	0,0050	0,0002

*Statistički pokazatelji uspješnosti aproksimacije*

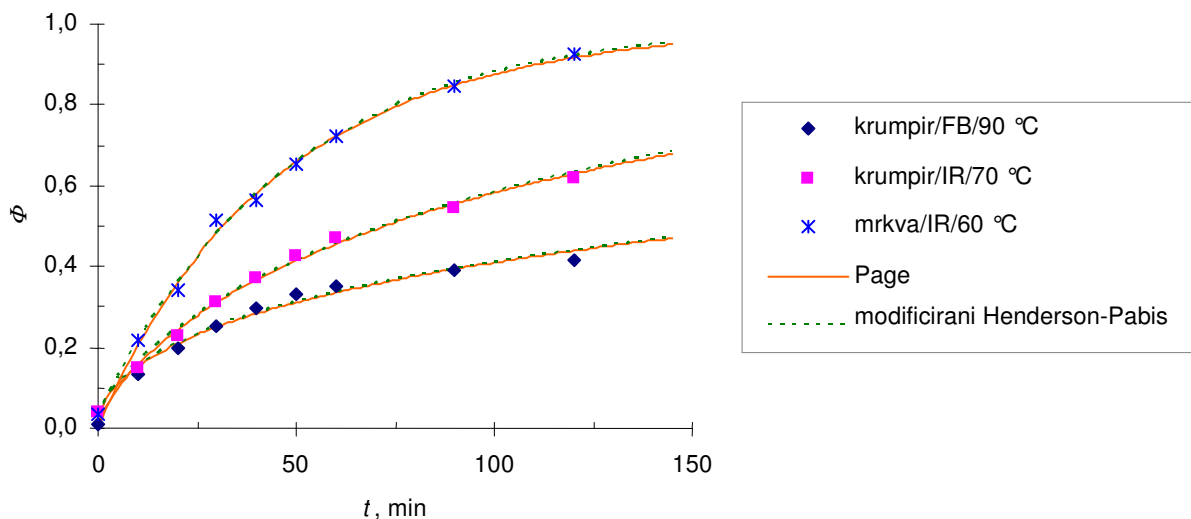


**Slika 4.40** Srednje apsolutno odstupanje [MEB], srednja kvadratna pogreška [RMSE] i reducirani chi-kvadrat [ $\chi^2$ ] aproksimacije eksperimentalnih podataka s odabranim modelima za rehidraciju uzoraka mrkve [M.I, M.II] sušenih infracrvenim sušenjem pri različitim temperaturama sušenja



**Slika 4.41** Srednja relativna pogreška [E%] i efikasnost odabranih modela [EF] u predviđanju kinetike rehidracije mrkve (uzorci [M.I, M.II]) za različite temperature sušenja (sušenje je provedeno radijacijskim prijenosom topline – infracrveno sušenje)

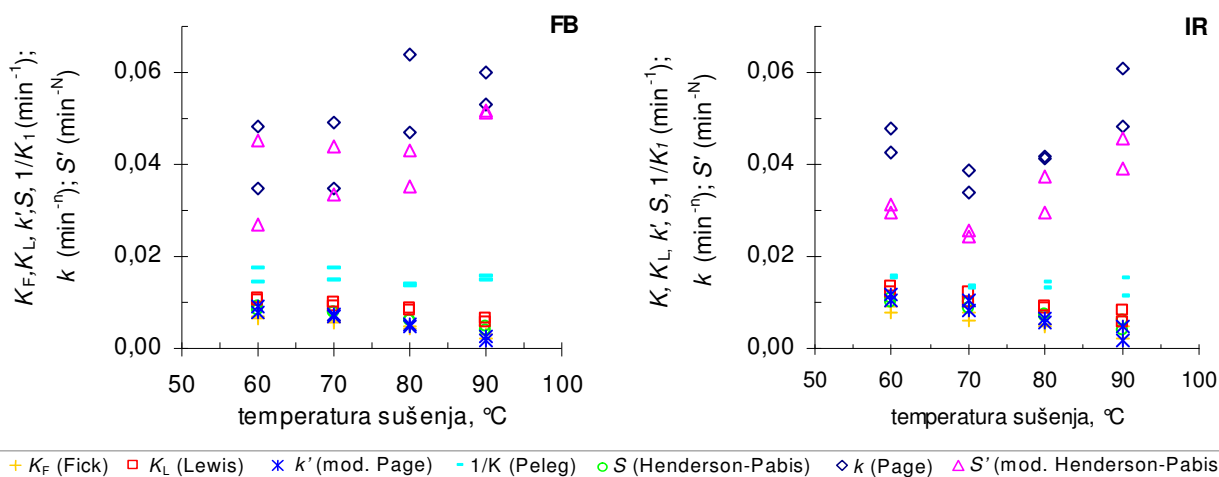
Vrijednosti statističkih parametara (*Tablice 4.13-16, Slike 4.28-29, 4.32-33, 4.36-37, 4.40-41*) za provedeno aproksimiranje eksperimentalnih podataka rehidracije, pokazali su da su vrijednosti izračunate prema Pageovom modelu i njegovim modifikacijama (Sander i modificirani Page) te modificiranim Henderson-Pabisovim modelom u najboljoj korelaciji s eksperimentalnim podacima. Navedeno potvrđuju i primjeri krivulja rehidracije koje prikazuje *Slika 4.42*. Najmanje slaganje s eksperimentalnim rezultatima imali su modeli Fick i Lewis premda su i za njih dobivene zadovoljavajuće viske vrijednosti regresijskih koeficijenata koji ukazuju na jaku do potpunu korelaciju između mjerenih i izračunatih vrijednosti.



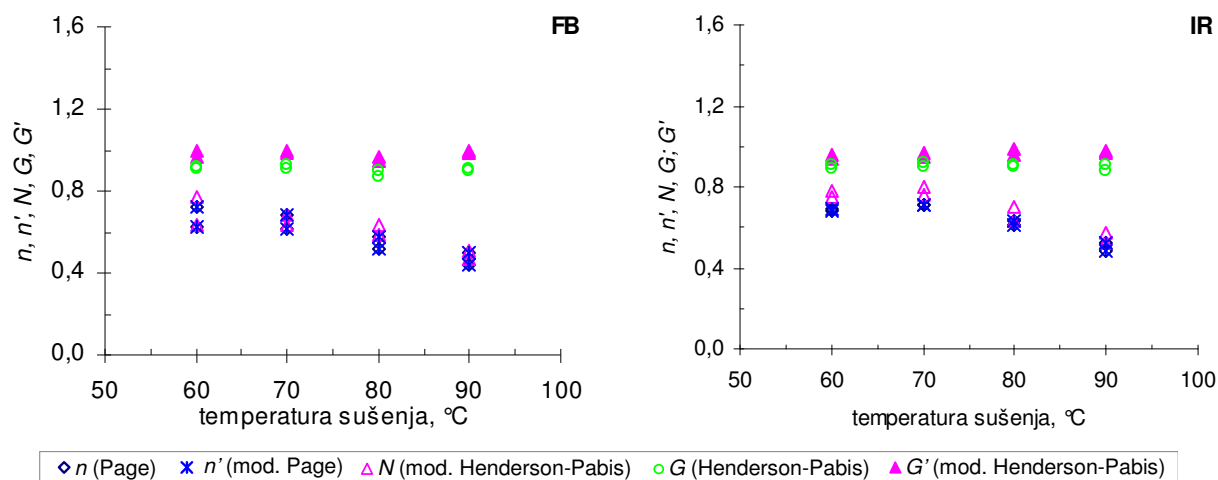
**Slika 4.42** Primjer slaganja eksperimentalnih i aproksimacijskih krivulja rehidracije sušenog povrća ([FB] konvekcijesko sušenje u fluidiziranom sloju; [IR] infracrveno sušenje)

#### 4.2.3. Utjecaj načina i temperature sušenja na procijenjene parametre matematičkih modela rehidracije

##### Za rehidraciju sušenog krumpira

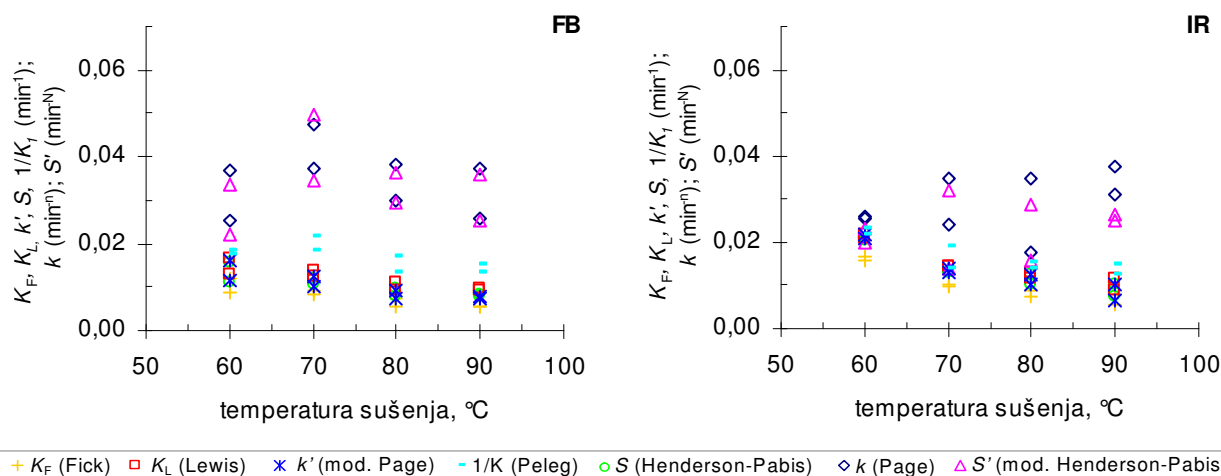


**Slika 4.43** Utjecaj temperature sušenja na parametre odabranih modela, koji u sebi sadrže dimenziju vremena, za oba uzorka krumpira (K.I, K.II) sušena konvekcijeski u fluidiziranom sloju [FB], odnosno radijacijskim [IR] načinom sušenja, a potom rehidratirana

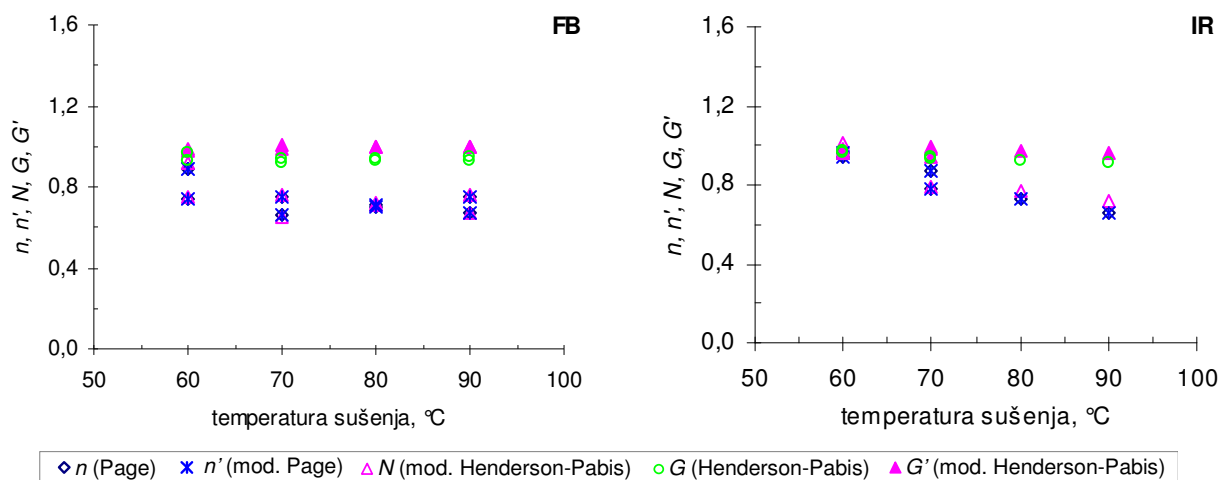


**Slika 4.44** Utjecaj temperature sušenja na bezdimenzionalne parametre modela ( $n$ ,  $n'$ ,  $N$ ) za oba uzorka krumpira (K.I, K.II) sušena konvekcijski u fluidiziranom sloju [FB], odnosno radijacijskim [IR] načinom sušenja, a potom rehidratirana

#### Za rehidraciju sušene mrkve



**Slika 4.45** Utjecaj temperature sušenja na parametre odabranih modela, koji u sebi sadrže dimenziju vremena, za oba uzorka mrkve (M.I, M.II) sušena konvekcijski u fluidiziranom sloju [FB], odnosno radijacijskim [IR] načinom sušenja, a potom rehidratirana



**Slika 4.46** Utjecaj temperature sušenja na bezdimenzionalne parametre modela ( $n$ ,  $n'$ ,  $N$ ,  $G$ ,  $G'$ ) za oba uzorka mrkve (M.I, M.II) sušena konvekcijski u fluidiziranom sloju [FB], odnosno radijacijskim [IR] načinom sušenja, a potom rehidratirana

**Tablica 4.17** Vrijednosti statističkog pokazatelja ( $F$  - koeficijent) za značajnost utjecaja uzorka, temperature sušenja i načina sušenja na parametre Pageova, Henderson-Pabisova i modificiranog Henderson-Pabisova modela za rehidrataciju krumpira i mrkve

POVRĆE	FAKTOR UTJECAJA	F - koeficijent						
		Page model		Henderson-Pabis model		modificirni Henderson-Pabis model		
		$k$	$n$	$G$	$S$	$G'$	$S'$	$N$
krumpir	uzorak (I, II)	1,78 <sup>ns</sup>	8,29 <sup>ns</sup>	1,47 <sup>ns</sup>	2,20 <sup>ns</sup>	0,25 <sup>ns</sup>	0,77 <sup>ns</sup>	2,92 <sup>ns</sup>
	način sušenja	1,52 <sup>ns</sup>	12,45 <sup>**</sup>	0,07 <sup>ns</sup>	9,27 <sup>*</sup>	5,70 <sup>*</sup>	7,34 <sup>*</sup>	13,53 <sup>**</sup>
	temperatura sušenja	3,79 <sup>ns</sup>	44,59 <sup>**</sup>	1,76 <sup>ns</sup>	37,97 <sup>**</sup>	1,10 <sup>ns</sup>	4,66 <sup>*</sup>	23,25 <sup>**</sup>
	interakcija <sup>a</sup>	1,06 <sup>ns</sup>	1,13 <sup>ns</sup>	1,93 <sup>ns</sup>	0,30 <sup>ns</sup>	2,47 <sup>ns</sup>	0,38 <sup>ns</sup>	0,52 <sup>ns</sup>
mrkva	uzorak (I, II)	5,32 <sup>ns</sup>	4,77 <sup>ns</sup>	4,31 <sup>ns</sup>	3,67 <sup>ns</sup>	0,32 <sup>ns</sup>	2,17 <sup>ns</sup>	2,10 <sup>ns</sup>
	način sušenja	3,68 <sup>ns</sup>	8,54 <sup>*</sup>	1,68 <sup>ns</sup>	19,45 <sup>**</sup>	8,25 <sup>*</sup>	7,35 <sup>*</sup>	10,13 <sup>*</sup>
	temperatura sušenja	1,18 <sup>ns</sup>	5,12 <sup>*</sup>	4,11 <sup>ns</sup>	30,64 <sup>**</sup>	0,29 <sup>ns</sup>	0,73 <sup>ns</sup>	3,21 <sup>ns</sup>
	interakcija <sup>a</sup>	1,18 <sup>ns</sup>	1,05 <sup>ns</sup>	1,82 <sup>ns</sup>	4,64 <sup>*</sup>	0,52 <sup>ns</sup>	0,70 <sup>ns</sup>	0,50 <sup>ns</sup>

<sup>a</sup> interakcija: način sušenja / temperatura sušenja

<sup>ns</sup> utjecaj faktora nije statistički opravdan

<sup>\*</sup> utjecaj faktora je statistički opravdan uz  $P = 5\%$

<sup>\*\*</sup> utjecaj faktora je statistički opravdan uz  $P = 1\%$

**Tablica 4.18** Funkcionalne ovisnosti parametara modificiranog Henderson-Pabisova i Pageova modela o temperaturi sušenja za rehidraciju uzoraka krumpira i mrkve prethodno sušena konvekcijski u fluidiziranom sloju i infracrvenim sušenjem (za eksperimentalne uvjete rehidracije *Slike 4.43-46*)

sušenje/povrće		modificirani Henderson-Pabis	Page
FB	krumpir	$G' = 0,0002 \cdot \vartheta + 0,9723$ $S' = 0,00 + 15 \cdot \vartheta - 0,063$ $N = -0,007 \cdot \vartheta + 1,1398$	$k = 0,0006 \cdot \vartheta - 0,0052$ $n = -0,007 \cdot \vartheta + 1,1098$
	mrkva	$G' = 0,0004 \cdot \vartheta + 0,9657$ $S' = 9 \cdot 10^{-5} \cdot \vartheta + 0,0243$ $N = -0,0036 \cdot \vartheta + 1,1011$	$k = 0,0002 \cdot \vartheta + 0,0219$ $n = -0,003 \cdot \vartheta + 0,9623$
IR	krumpir	$G' = 0,0009 \cdot \vartheta + 0,8915$ $S' = 0,0004 \cdot \vartheta + 0,0002$ $N = -0,0076 \cdot \vartheta + 1,256$	$k = 0,0003 \cdot \vartheta + 0,0192$ $n = -0,0063 \cdot \vartheta + 1,1078$
	mrkva	$G' = 6 \cdot 10^{-5} \cdot \vartheta + 0,9669$ $S' = 0,0001 \cdot \vartheta + 0,0138$ $N = -0,0071 \cdot \vartheta + 1,4099$	$k = 0,0002 \cdot \vartheta + 0,0119$ $n = -0,0072 \cdot \vartheta + 1,3702$

$\vartheta$  – temperatura sušenja, °C

FB – konvekcijsko sušenje u fluidiziranom sloju

IR – infracrveno sušenje

Na isti način kao i kod sušenja, uvrštavanjem dobivenih funkcionalnih ovisnosti parametara modela o temperaturi sušenja (*Tablica 4.18*) u matematičke modele (3.11) i (3.15), dobivaju se izrazi (*Tablica 4.19*) koji omogućuju simuliranje kinetike rehidracije uzoraka krumpira i mrkve sušenih u širem području eksperimentalnih uvjeta sušenja.

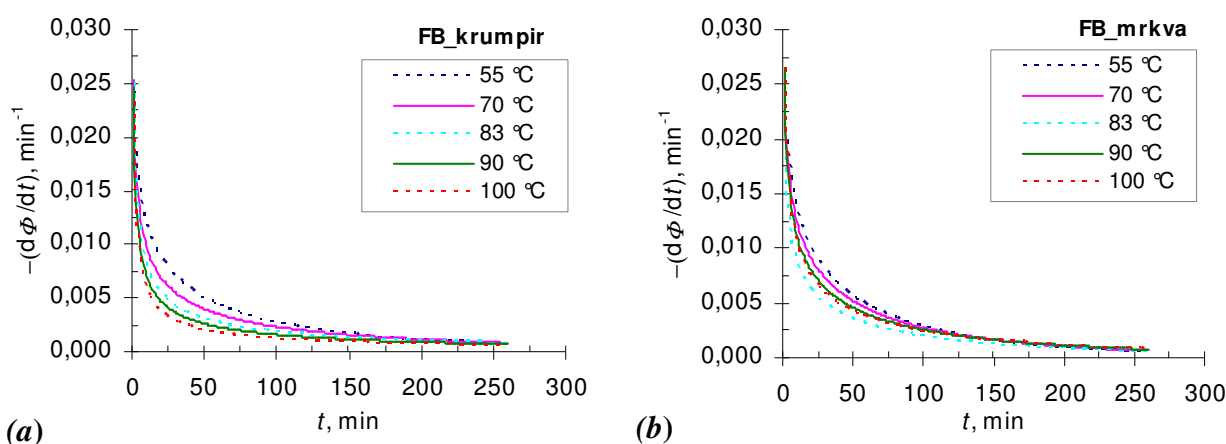
Konkretan primjer primjene izraza simulaciju brzine rehidracije (za pokusne uvjete) uzoraka povrća sušenih pri različitim temperaturama prikazuju *slike 4.47-48*.



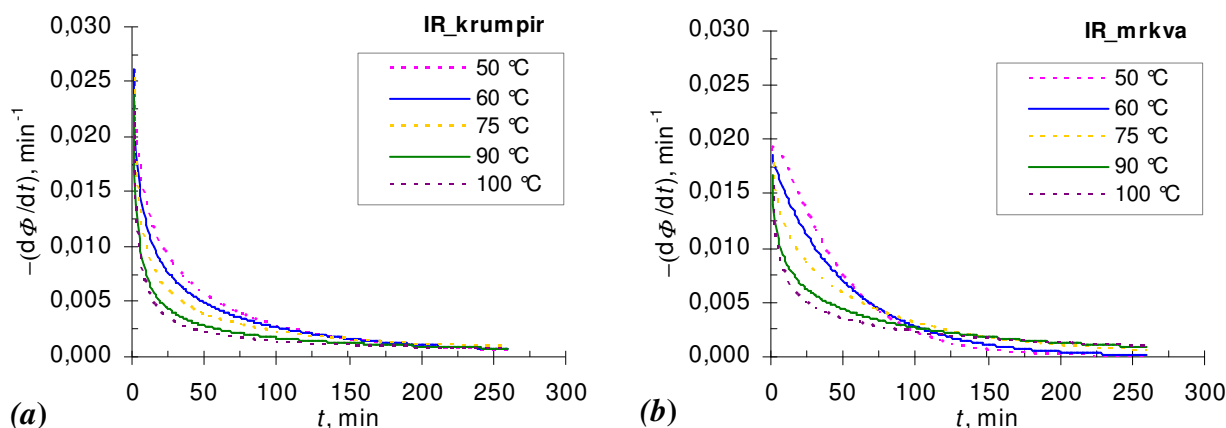
**Tablica 4.19** Matematički izrazi koji omogućuju simulaciju kinetike rehidracije sušenih uzoraka krumpira i mrkve, odnosno za procjenu vlažnosti ( $\Phi$ ) povrća u određenom vremenu rehidracije ( $t$ , min) ovisno o temperaturi ( $\vartheta$ , °C) i načinu sušenja

model*		FB sušenje (konvekcijsko sušenje u fluidiziranom sloju)
krumpir	m.HP	$\Phi = (0,0002 \cdot \vartheta + 0,9816) \cdot \exp\left[-(0,0015 \cdot \vartheta - 0,029) \cdot t^{(-0,0017 \cdot \vartheta + 0,9688)}\right]$
	P	$\Phi = \exp\left[-(0,0015 \cdot \vartheta - 0,0234) \cdot t^{(-0,0015 \cdot \vartheta + 0,9525)}\right]$
mrkva	m.HP	$\Phi = (0,0002 \cdot \vartheta + 0,9818) \cdot \exp\left[-(0,0005 \cdot \vartheta + 0,031) \cdot t^{(0,0042 \cdot \vartheta + 0,6238)}\right]$
	P	$\Phi = \exp\left[-(0,0005 \cdot \vartheta + 0,0357) \cdot t^{(0,0026 \cdot \vartheta + 0,7524)}\right]$
		IR sušenje (infracrveno sušenje)
krumpir	m.HP	$\Phi = (-0,0001 \cdot \vartheta + 0,9948) \cdot \exp\left[-(0,0006 \cdot \exp(0,0271 \cdot \vartheta)) \cdot t^{(0,0011 \cdot \vartheta + 1,175)}\right]$
	P	$\Phi = \exp\left[-(0,0007 \cdot \exp(0,0281 \cdot \vartheta)) \cdot t^{(0,0007 \cdot \vartheta + 1,1756)}\right]$
mrkva	m.HP	$\Phi = (-3 \cdot 10^{-5} \cdot \vartheta + 0,9862) \cdot \exp\left[-(0,0004 \cdot \exp(0,0298 \cdot \vartheta)) \cdot t^{(0,001 \cdot \vartheta + 1,2667)}\right]$
	P	$\Phi = \exp\left[-(0,0005 \cdot \exp(0,00283 \cdot \vartheta)) \cdot t^{(0,0007 \cdot \vartheta + 1,2366)}\right]$

\* m.HP – modificirani Henderson-Pabis model; P – Page model



**Slika 4.47** Krivulje rehidracije uzoraka krumpira i mrkve konvekcijski sušenih u fluidiziranom sloju pri različitim temperaturama (ovisnost brzine sušenja  $[-(d\Phi/dt)]$  o vremenu sušenja ( $t$ )), prema modificiranom Henderson-Pabis modelu (a), odnosno Page modelu (b). Isprekidanim linijama prikazane su (simulacijske) krivulje za proizvoljno odabrane temperature sušenja



**Slika 4.48** Krivulje rehidracije uzoraka krumpira i mrkve prethodno sušenih infracrvenim sušenjem pri različitim temperaturama (ovisnost brzine sušenja  $[-(d\Phi/dt)]$  o vremenu sušenja ( $t$ ]), prema Page modelu (a), odnosno modificiranom Henderson-Pabis modelu (b). Isprekidanim linijama prikazane su (simulacijske) krivulje za proizvoljno odabrane temperature sušenja

#### 4.2.4. Vrijednosti (rehidracijskog) efektivnog koeficijenta difuzije vlage

Koeficijenta efektivne difuzije vlage ( $D_{ef}$ ) za proces rehidracije, procijenjen je za različite načine i temperature sušenja krumpira i mrkve prema Fickovom, Lewisovom, Pageovom, Henderson-Pabisovom i modificiranom Henderson-Pabis modelu, odnosno izrazima prikazanim u *tablicama 3.1-2*.

Dobiveni rezultati međusobno su uspoređeni te je (prema Arrheniusu) određena njihova ovisnost o temperaturi sušenja i izračunata energija aktivacije za difuziju vlage prema pojedinom modelu. Također su dobivene vrijednosti  $D_{ef}$  stavljene u odnos s parametrima modela prema kojima su i izračunate.

**Tablica 4.20** Vrijednosti efektivnog (rehidracijskog) koeficijenta difuzije izračunate prema različitim matematički modelima za uzorke (krumpira i mrkve) sušene konvekcijski u fluidiziranom sloju [FB], odnosno radijacijskim načinom sušenja [IR]

matematički model		Fick	Lewis	Page	Henderson-Pabis	modificirani Henderson-Pabis	
sušenje	$\vartheta$	$D_{ef} \cdot 10^9, m^2/s$					
krumpir	FB	60 °C	0,29	0,45	1,75	6,91	6,10
		70 °C	0,25	0,41	1,77	6,16	5,32
		80 °C	0,20	0,35	2,33	4,76	3,61
		90 °C	0,11	0,26	2,38	3,33	1,75
	IR	60 °C	0,36	0,54	1,91	8,20	7,44
		70 °C	0,30	0,47	1,52	7,15	6,29
		80 °C	0,22	0,37	1,75	5,46	4,52
		90 °C	0,15	0,29	2,30	3,86	2,53
mrkva	FB	60 °C	0,43	0,62	1,31	10,06	8,78
		70 °C	0,37	0,55	1,79	8,73	8,12
		80 °C	0,27	0,43	1,44	6,74	6,00
		90 °C	0,24	0,40	1,32	6,24	5,45
	IR	60 °C	0,68	0,90	1,08	14,92	11,54
		70 °C	0,42	0,61	1,24	9,88	8,37
		80 °C	0,35	0,52	1,11	8,37	7,14
		90 °C	0,28	0,44	1,44	6,77	5,90

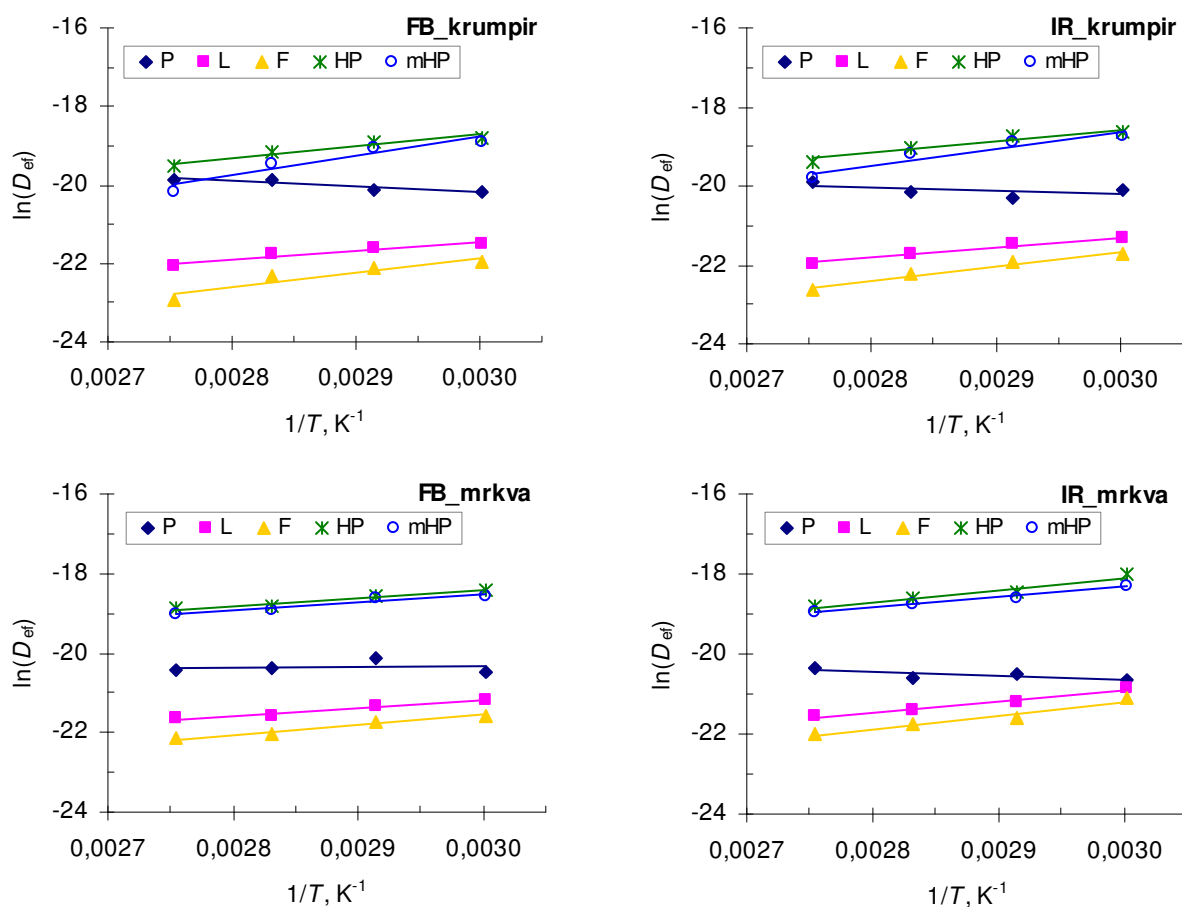
Analiza varijance i *post hoc* LSD-test nije pokazao da postoji opravdana razlika između vrijednosti  $D_{ef}$  za krumpir i mrkvu (za dobivene prema svim matematičkim modelima),  $p$ -vrijednost iznosila je 0,12296 ( $> 0,05$ ).

**Tablica 4.21** Vrijednosti statističkog pokazatelja za utvrđivanje postojanja razlike ( $p$ -vrijednost;  $p < 0,0500 =$  statistički značajno) i korelacije (indeks korelacije) između vrijednosti efektivnog koeficijenta difuzije vlage za rehidraciju, određenih prema različitim modelima

MODEL	$p$ – vrijednost ( $p < 0,0500$ statistički značajno)				
	Fick	Lewis	Page	H.Pabis <sup>a</sup>	mod.H.Pabis <sup>b</sup>
Fick		0,7773	0,0260	0,0000	0,0000
Lewis	0,7773		0,0506	0,0000	0,0000
Page	0,0260	0,0506		0,0000	0,0000
H.Pabis <sup>a</sup>	0,0000	0,0000	0,0000		0,0524
mod.H.Pabis <sup>b</sup>	0,0000	0,0000	0,0000	0,0524	
	indeks korelacije (R)				
Fick		0,9995	-0,7120	0,9979	0,9981
Lewis	0,9995		-0,7078	0,9981	0,9704
Page	-0,7120	-0,7078		-0,7442	-0,7795
H.Pabis <sup>a</sup>	0,9979	0,9981	-0,7442		0,9768
mod.H.Pabis <sup>b</sup>	0,9702	0,9704	-0,7795	0,9768	

<sup>a</sup> Henderson-Pabis model

<sup>b</sup> modificirani Henderson-Pabis model



**Slika 4.49** Utjecaj temperature sušenja na vrijednosti efektivnog difuzijskog koeficijenta rehidracije izračunatih prema različitim za sve uzorke krumpira i mrkve sušene konvekcijski u fluidizirajućem sloju [FB] i infracrvenim načinom sušenja [IR] te potom rehidratirane

**Tablica 4.22** Vrijednosti energije aktivacije [ $E_a$ ] za efektivnu difuziju vlage tijekom rehidracije sušenih uzoraka krumpira i mrkve određene prema Arrheniusu i ovisnostima prikazanim na slici 4.49

SUŠENJE*	MODEL	$E_a$ , kJ/mol		$D_0$ , m <sup>2</sup> /s	
		krumpir	mrkva	krumpir	mrkva
FB	Fick	31,22	20,77	$4,08 \cdot 10^{-15}$	$2,42 \cdot 10^{-13}$
	Lewis	18,02	15,72	$7,08 \cdot 10^{-13}$	$2,14 \cdot 10^{-12}$
	Page	12,03	1,72	$1,30 \cdot 10^{-07}$	$8,00 \cdot 10^{-10}$
	Henderson-Pabis	24,47	17,04	$1,08 \cdot 10^{-12}$	$2,15 \cdot 10^{-11}$
	mododificirani Henderson-Pabis	41,22	14,41	$2,44 \cdot 10^{-15}$	$1,69 \cdot 10^{-11}$
IR	Fick	29,41	28,75	$9,36 \cdot 10^{-15}$	$1,97 \cdot 10^{-14}$
	Lewis	21,09	23,32	$2,76 \cdot 10^{-13}$	$1,87 \cdot 10^{-13}$
	Page	6,73	7,70	$1,90 \cdot 10^{-08}$	$1,62 \cdot 10^{-08}$
	Henderson-Pabis	25,31	25,62	$9,35 \cdot 10^{-13}$	$1,36 \cdot 10^{-12}$
	mododificirani Henderson-Pabis	35,62	21,91	$2,15 \cdot 10^{-14}$	$4,09 \cdot 10^{-12}$

\* FB – konvekcijsko sušenje u fluidiziranom sloju; IR – infracrveno sušenje

#### 4.2.5. Vrijednosti Biotova broja i koeficijenta prijenosa tvari kod rehidracije

Vrijednosti Biotova broja ( $Bi_m$ ) i koeficijenta prijenosa mase ( $k_m$ ) izračunate su prema prijedlogu Dincera i Dosta korištenjem procijenjenih parametara Henderson-Pabisova modela kao i korištenjem procijenjenih parametara (predloženog) modificiranog Henderson-Pabisova modela (Tablice 3.1-2), a dobivene vrijednosti prikazane su u Tablici 4.23.

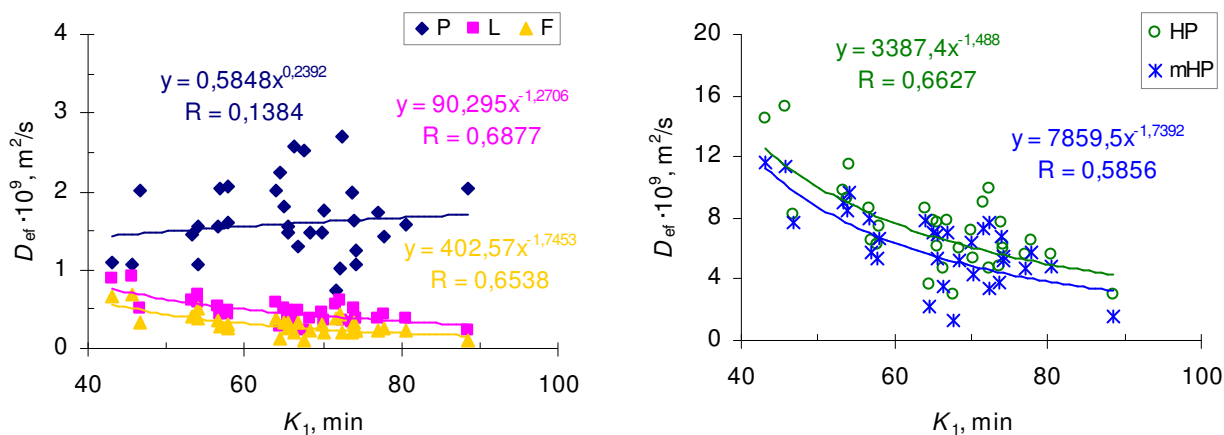
**Tablica 4.23** Vrijednosti bezdimenzionalnog  $Bi_m$ -broja i koeficijenta prijenosa mase ( $k_m$ ) za rehidraciju uzoraka krumpira i mrkve sušenih konvekcijskim načinom sušenja u fluidiziranom sloju [FB] i infracrvenim [IR] načinom sušenja pri različitim temperaturama sušenja izračunate iz Henderson-Pabisova i modificiranog Henderson-Pabis modela

matematički model		Henderson-Pabis		modificirani Henderson-Pabis		
sušenje	$\vartheta$	$Bi_m$	$k_m \cdot 10^7, \text{ m/s}$	$Bi_m$	$k_m \cdot 10^7, \text{ m/s}$	
krumpir	FB	60 °C	0,005	0,15	0,024	0,60
		70 °C	0,006	0,14	0,018	0,38
		80 °C	0,002	0,04	0,010	0,15
		90 °C	0,003	0,04	0,004	0,03
	IR	60 °C	0,003	0,10	0,029	0,85
		70 °C	0,005	0,14	0,034	0,85
		80 °C	0,004	0,10	0,017	0,31
		90 °C	0,003	0,04	0,006	0,07
mrkva	FB	60 °C	0,015	0,63	0,061	2,22
		70 °C	0,008	0,28	0,027	0,90
		80 °C	0,009	0,24	0,026	0,63
		90 °C	0,011	0,27	0,028	0,62
	IR	60 °C	0,026	1,57	0,123	5,66
		70 °C	0,010	0,41	0,071	2,32
		80 °C	0,019	0,66	0,070	2,03
		90 °C	0,007	0,19	0,033	0,83

**Tablica 4.24** Vrijednosti statističkog pokazatelja ( $F$  – koeficijent) za utjecaj temperature i načina sušenja na specifične parametre prijenosa mase za proces rehidracije ( $Bi_m$ ,  $D_{ef}$ ,  $k_m$ ) izračunate iz parametara Henderson-Pabisova i modificiranog Henderson-Pabisova modela

POVRĆE	FAKTOR UTJECAJA	F - koeficijent					
		Henderson-Pabis model			modificirani Henderson-Pabis model		
		$Bi_m$	$D_{ef}$	$k_m$	$Bi_m$	$D_{ef}$	$k_m$
krumpir	način sušenja	0,28 <sup>ns</sup>	8,85 *	0,02 <sup>ns</sup>	8,55 *	10,12 **	9,43 *
	temperatura	1,92 <sup>ns</sup>	34,79 **	8,91 **	15,85 **	42,13 **	17,43 **
	interakcija <sup>a</sup>	1,46 <sup>ns</sup>	0,32 <sup>ns</sup>	1,76 <sup>ns</sup>	1,33 <sup>ns</sup>	0,14 <sup>ns</sup>	1,46 <sup>ns</sup>
mrkva	način sušenja	2,33 <sup>ns</sup>	19,24 *	6,49 *	8,51 *	14,31 **	8,00 *
	temperatura	3,00 <sup>ns</sup>	31,53 **	8,05 *	3,76 <sup>ns</sup>	10,80 **	23,62 **
	interakcija <sup>a</sup>	1,26 <sup>ns</sup>	4,28 <sup>ns</sup>	2,56 <sup>ns</sup>	0,81 <sup>ns</sup>	2,45 <sup>ns</sup>	1,97 <sup>ns</sup>

<sup>a</sup> interakcija: način sušenja / temperatura sušenja  
<sup>ns</sup> utjecaj faktora nije statistički opravdan  
\* utjecaj faktora je statistički opravdan uz P = 5%  
\*\* utjecaj faktora je statistički opravdan uz P = 1%



**Slika 4.50** Odnos koeficijenata efektivne difuzije [ $D_{ef}$ ] i Pelegove konstante brzine rehidracije [ $K_1$ ] za sve uzorke povrća, oba načina sušenja i sve temperature sušenja (modeli prema kojima je procijenjen  $D_{ef}$  - Fick [F], Lewis [L], Page [P], Henderson-Pabis [HP], modificirani Henderson-Pabis [mHP])

### 4.3. Određivanje kvalitativnih svojstava povrća

U ovom dijelu poglavlja (4.) prikazani su rezultati određivanja pojedinih kvalitativnih svojstava, koja su imali za cilj procjenu nastalih promjena povrća nakon sušenja i rehidracije.

Odabrana svojstva povrća određena su svježim, sušenim i/ili rehidratirani uzorcima. U zasebnim podpoglavljima dani su rezultati za krumpir i za mrkvu, a svako od njih sastoji sadrži podatke za slijedeća svojstva:

- boju (optičko svojstvo),
- volumen (strukturno svojstvo),
- maksimalnu silu kompresije (teksturalno svojstvo),
- sadržaj ukupnih fenolnih tvari i antioksidacijsko djelovanje (nutritivno svojstvo).

Dobivene vrijednosti za pojedina svojstva materijala statistički su obrađene i međusobno uspoređene kako bi se mogle procijeniti promjene svojstava koje su nastale kao posljedica primjene određenih uvjeta sušenja (načina i temperature sušenja).

Konvekcijsko sušenje krumpira i mrkve (uzorci: K.III, M.III) u fluidiziranom sloju i infracrveno sušenje provedeno je pri temperaturama sušenja od (60-90) °C u određenom vremenskom trajanju. Vrijeme sušenja potrebno za sušenje svježeg povrća do 10% sadržaja vlage, za pojedini režim sušenja, određeno je prema rezultatima pokusa sušenja prikazanim u podpoglavljju (4.1.), odnosno korištenjem predloženog modificiranog-Henderson-Pabisova modela (4.3) i funkcionalnih ovisnosti parametara modela o temperaturi sušenja (*Tablica 4.6*).

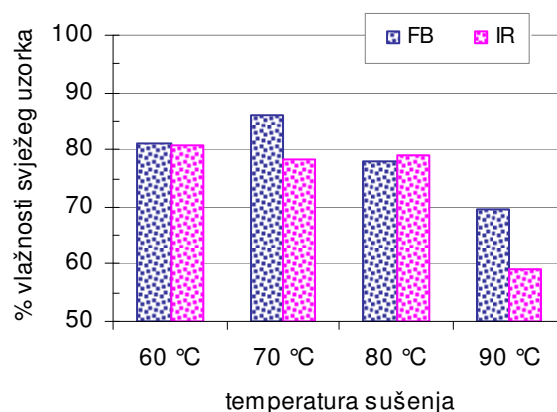
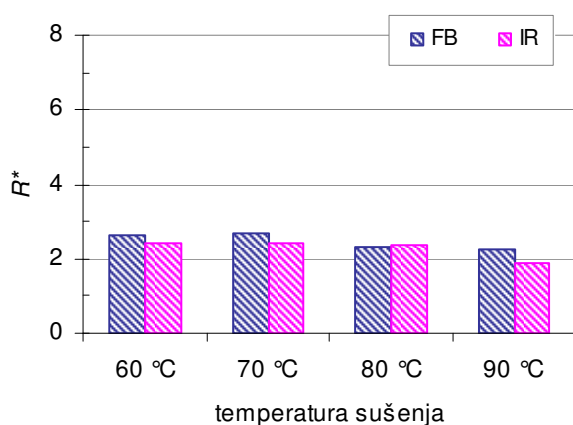
Sušenjem povrća prema navedenim uvjetima, dobiveni su osušeni uzorci krumpira i mrkve s 10 ( $\pm 2$ )-tnim sadržajem vlage.

Svi osušeni uzorci povrća rehidratirani su u trajanju od 120 minuta, potapanjem u destiliranu vodu temperature 26 °C.

### 4.3.1. Krumpir

#### 4.3.1.1. Rehidrationska svojstva sušenih uzoraka krumpira

Rehidrationska svojstva uzoraka krumpira sušenih do 10% (wb) udjela vlage prikazana su rehidrationskim omjerom ( $R^*$ ), a rehidrationski doseg prikazan je kao postotni udio vlažnosti svježeg uzorka krumpira (prije sušenja) u ovisnosti o temperaturi sušenja i načinu sušenja te je analizom varijance procijenjen njihov utjecaj na doseg rehidrationske.



**Slika 4.51** Rehidrationski omjer ( $R^*$ ) uzoraka krumpira u ovisnosti o temperaturi sušenja i načinu sušenja (konvekcijsko sušenje u fluidiziranom sloju [FB]; infracrveno sušenje [IR])

**Slika 4.52** Utjecaj temperature sušenja na doseg rehidrationske uzoraka krumpira sušenih konvekcijski u fluidizirajućem sloju [FB] i infracrvenim načinom sušenja [IR]

**Tablica 4.25** Statistička značajnost ( $F$ -test) utjecaja načina sušenja i temperature sušenja na doseg rehidrationske uzorka krumpira prema dvofaktorijskom pokusu

Izvor varijacije	$F$ - koeficijent
ponavljanja	0,24 <sup>ns</sup>
način sušenja	31,73 <sup>**</sup>
temperatura sušenja	47,83 <sup>**</sup>
interakcija: sušenje-temperatura	7,27 <sup>**</sup>

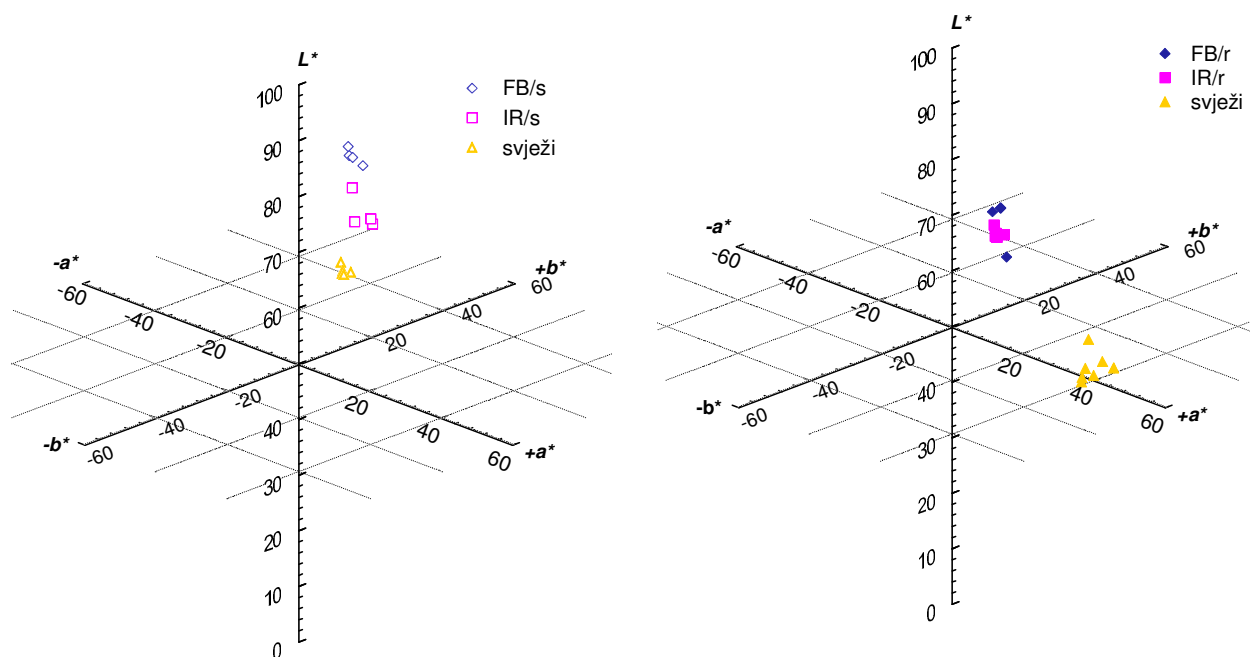
<sup>ns</sup> nije statistički značajno

\* statistički značajno uz  $p = 0,05$

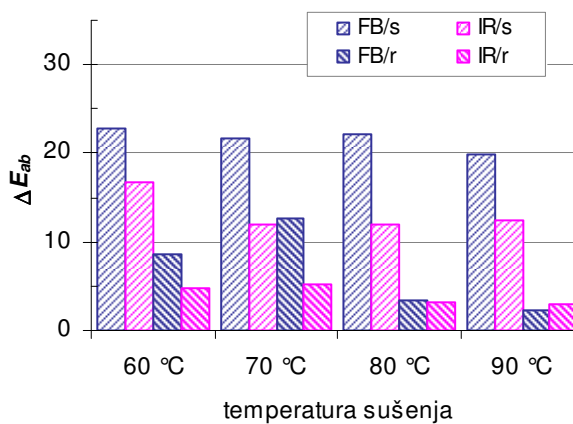
\*\* statistički značajno uz  $p = 0,01$



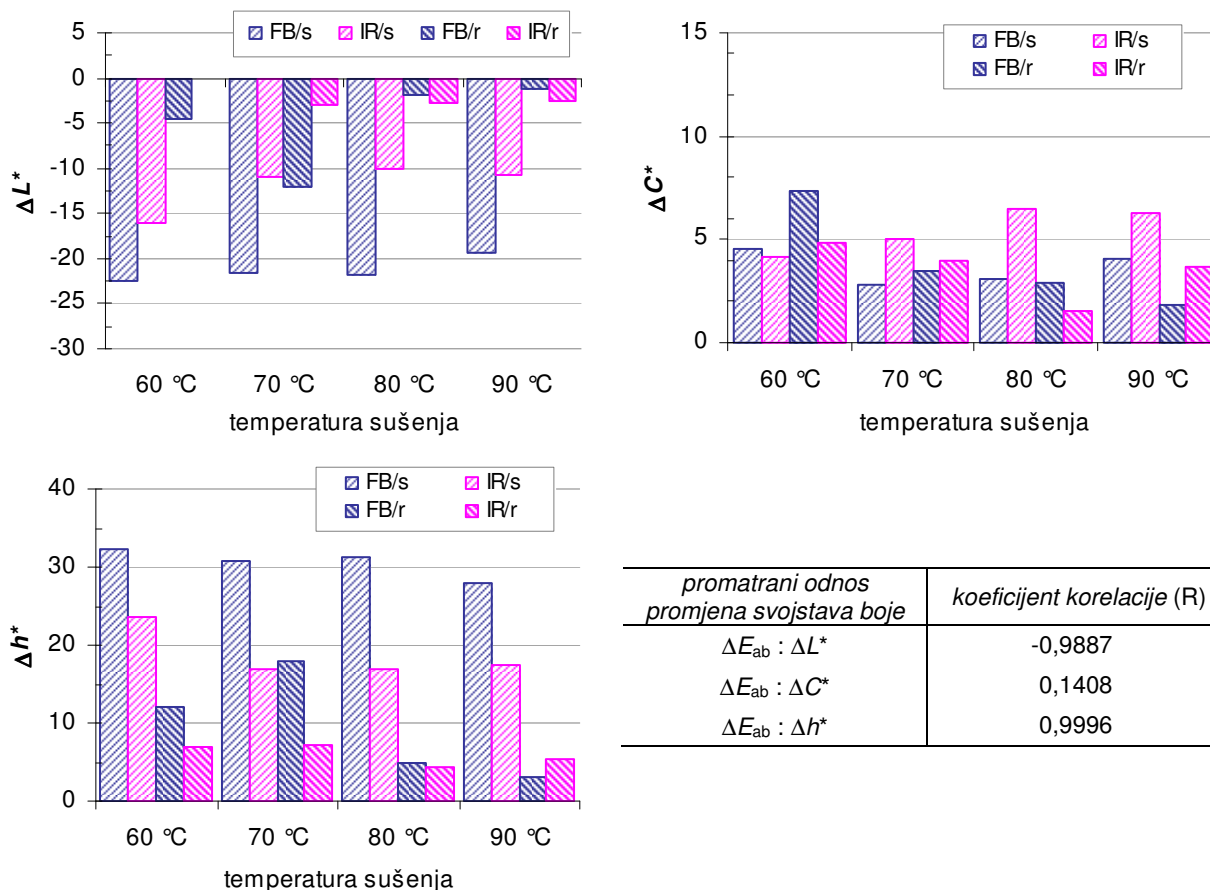
## 4.3.1.2. Boja svježih, sušenih i rehidratiranih uzoraka krumpira



**Slika 4.53** Parametri CIE- $L^*a^*b^*$  sistema boje [ $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ ] za svježe [svježi], sušene [s] i rehidratirane [r] uzorke krumpira (uzorak: K.III) - podaci za oba načina sušenja (konvekcijsko u fluidiziranom sloju [FB], radijacijsko [IR]) i sve temperature sušenja [(60, 70, 80, 90) °C]



**Slika 4.54** Vrijednosti ukupne promjene boje sušenih [s] i rehidratiranih [r] uzoraka krumpira (u odnosu na svježi uzorak krumpira(K.III)) u ovisnosti o temperaturi sušenja za dva različita načina sušenja (konvekcijsko u fluidiziranom sloju [FB], radijacijsko [IR])



**Slika 4.55** Promjene osnovnih svojstava boje krumpira (uzorak: K.III) uzrokovana sušenjem i rehidracijom ovisno o temperaturi sušenja i načinu sušenja, i njihova korelacija s ukupnom promjenom boje. ( $[\Delta L^*]$  promjena svjetline,  $[\Delta C^*]$  promjena kromatičnosti,  $[\Delta h^*]$  promjena tona,  $[\Delta E_{ab}]$  ukupna promjena boje; uzorci: svježi [svježi], sušeni [s], rehidratirani [r]; način sušenja: konvekcijsko u fluidiziranom sloju [FB], radijacijsko [IR])

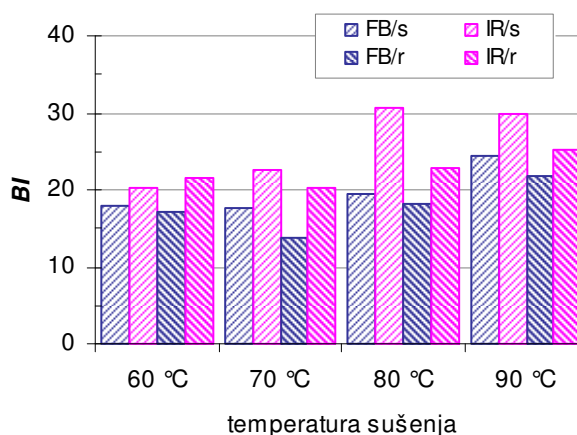
**Tablica 4.26** Statistička značajnost utjecaja ( $F$ -test) načina sušenja i temperature sušenja na ukupnu promjenu boje ( $\Delta E_{ab}$ ) sušenih i rehidratiranih uzoraka krumpira prema dvofaktorijalnom pokusu

Izvor varijacije	$F$ - koeficijent	
	sušeni uzorci	rehidratirani uzorci
ponavljanja	3,11 <sup>ns</sup>	2,39 <sup>ns</sup>
način sušenja	375,47 <sup>**</sup>	6,87 <sup>*</sup>
temperatura sušenja	86,93 <sup>**</sup>	5,65 <sup>**</sup>
interakcija: sušenje-temperatura	140,83 <sup>**</sup>	4,77 <sup>*</sup>

<sup>ns</sup> nije statistički značajno

<sup>\*</sup> statistički značajno uz  $p = 0,05$

<sup>\*\*</sup> statistički značajno uz  $p = 0,01$



**Slika 4.56** Vrijednosti indeksa posmeđivanja [*BI*] sušenih [s] i rehidratiranih [r] uzoraka krumpira (uzorak: K.III) u ovisnosti o temperaturi sušenja za dva različita načina sušenja (konvekcijsko u fluidiziranom sloju [FB], radijacijsko [IR])

**Tablica 4.27** Statistička značajnost (*F*-test) utjecaja načina sušenja i temperature sušenja na stupanj posmeđivanja (izraženo kao  $BI/BI_0$ )<sup>a</sup> sušenih i rehidratiranih uzoraka krumpira prema dvofaktorijalnom pokusu - slučajni blokni raspored sa 2x4 kombinacije i 3 ponavljanja (tj. minimalna, maksimalna i srednja vrijednost 10 mjerenja)

Izvor varijacije	<i>F</i> - koeficijent	
	sušeni uzorci	rehidratirani uzorci
<i>ponavljanja</i>	11,13 **	11,09 **
<i>način sušenja</i>	282,86 **	58,79 **
<i>temperatura sušenja</i>	127,29 **	11,16 **
<i>interakcija: sušenje-temperatura</i>	17,75 **	5,69 <sup>ns</sup>

<sup>ns</sup> nije statistički značajno

\* statistički značajno uz  $p = 0,05$

\*\* statistički značajno uz  $p = 0,01$

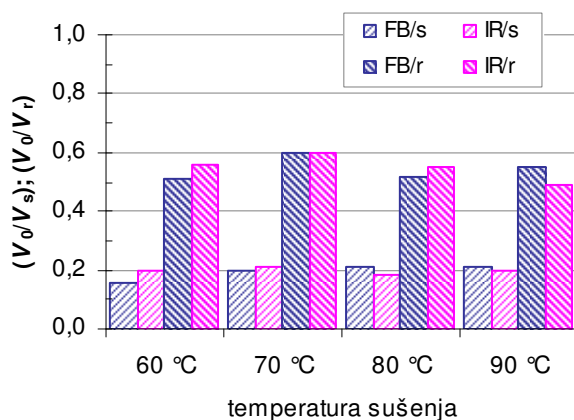
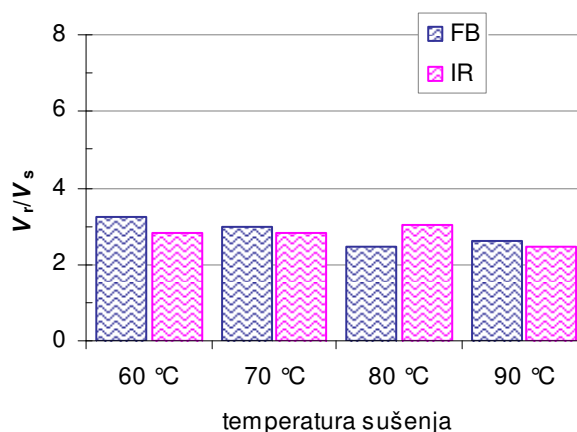
<sup>a</sup> indeks posmeđivanja: svježeg uzorka -  $BI_0$ , nakon sušenja/rehidratacije -  $BI$

## 4.3.1.3. Volumen svježih, sušenih i rehidratiranih uzoraka krumpira

**Tablica 4.28** Prosječne vrijednosti određenih volumena (ml) svježih, sušenih i rehidratiranih uzoraka krumpira

Temperatura sušenja		Konvekcijsko sušenje u fluidiziranom sloju				Radijacijsko sušenje			
		60 °C	70 °C	80 °C	90 °C	60 °C	70 °C	80 °C	90 °C
Uzorak	svježi	1,20	1,01	1,25	1,18	1,19	1,24	1,16	1,18
	sušeni	0,19	0,20	0,26	0,25	0,24	0,26	0,21	0,24
	rehidratirani	0,62	0,60	0,65	0,65	0,66	0,74	0,64	0,58

U tablici su prikazane srednje vrijednosti volumena određenih za po 10 uzoraka svakog pokus, uz maksimalnu standardnu devijaciju: SD < 0,03

**Slika 4.57** Ovisnost omjera prosječnih volumena svježih [ $V_0$ ] i sušenih [ $V_s$ ], odnosno rehidratiranih [ $V_r$ ] uzoraka krumpira (uzorak: K.III) o temperaturi sušenja za oba načina sušenja [FB; IR]**Slika 4.58** Omjer prosječnih volumena uzoraka krumpira (uzorak: K.III) nakon [ $V_r$ ] i prije [ $V_s$ ] rehidratacije za različite temperature sušenja i načine sušenja [FB – konvekcijsko sušenje u fluidiziranom sloju; IR – infracrveno sušenje]**Tablica 4.29** Statistička značajnost ( $F$ -test) utjecaja načina sušenja i temperature sušenja na promjenu volumena (izraženo kao  $V/V_0$ )<sup>a</sup> sušenih i rehidratiranih uzoraka krumpira (u odnosu na volumen svježeg uzorka) prema dvofaktorijalnom pokusu - slučajni blokni raspored sa 2x4 kombinacije i 3 ponavljanja (tj. minimalnom, maksimalnom i srednjom vrijednosti 10 mjerenja)

Izvor varijacije	$F$ - koeficijent	
	sušeni uzorci	rehidratirani uzorci
ponavljanja	0,00 <sup>ns</sup>	1,89 <sup>ns</sup>
način sušenja	0,47 <sup>ns</sup>	0,39 <sup>ns</sup>
temperatura sušenja	15,10 <sup>**</sup>	28,43 <sup>**</sup>
interakcija: sušenje-temperatura	18,17 <sup>**</sup>	13,08 <sup>**</sup>

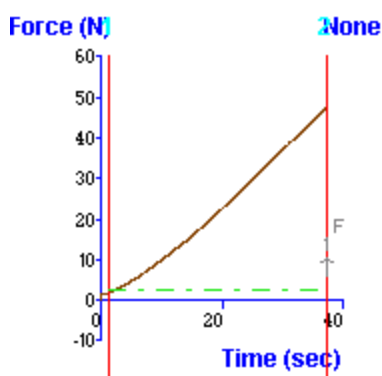
<sup>ns</sup> nije statistički značajno

\* statistički značajno uz  $p = 0,05$

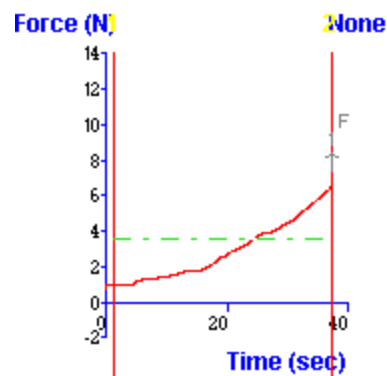
\*\* statistički značajno uz  $p = 0,01$

<sup>a</sup> volumen: svježeg uzorka -  $V_0$ , nakon sušenja/rehidratacije –  $V$

## 4.3.1.4. Teksturalna svojstva svježih, sušenih i rehidratiranih uzoraka krumpira



**Slika 4.59** Dijagram ovisnosti sile i vremena jednosmjerne kompresije svježeg uzorka krumpira (10 ponavljanja)

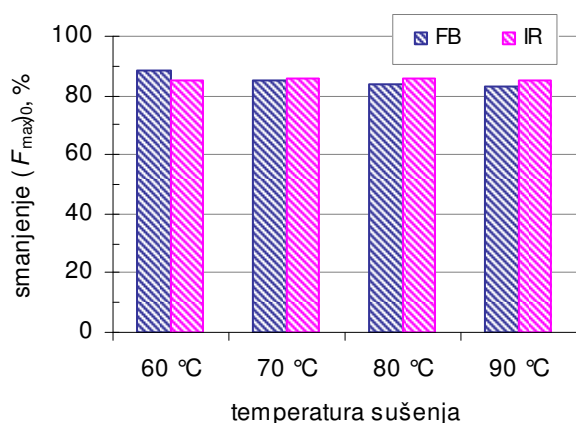


**Slika 4.60** Primjer tipičnih krivulja ovisnosti sile kompresije o vremena jednosmjerne kompresije rehidratiranih uzoraka krumpira (prethodno sušeni radijacijskim načinom sušenja pri temperaturi od 90 °C )

**Tablica 4.30** Vrijednosti maksimalne [ $F_{max}$ , N] i srednje [ $F_{mean}$ , N] sile potrebne za 15%-tnu kompresiju svježih uzoraka i rehidratiranih (prethodno sušenih) uzoraka krumpira

Temperatura sušenja	Svježi uzorak	Konvekcijsko sušenje u fluidiziranom sloju				Radijacijsko sušenje				
		60 °C	70 °C	80 °C	90 °C	60 °C	70 °C	80 °C	90 °C	
$F_{max}$	$(F_{max})_{sr}$ , N	49,10	5,54	7,41	7,79	7,94	7,36	6,99	7,03	7,35
	SD	1,58	0,33	1,95	0,88	1,26	0,42	0,74	0,46	0,48
$F_{mean}$	$(F_{mean})_{sr}$ , N	23,70	2,69	3,32	4,03	4,12	3,47	3,35	3,52	3,67
	SD	1,52	0,32	0,62	0,30	0,74	0,30	0,42	0,20	0,24

U tablici su prikazane srednje vrijednosti maksimalne i srednje sile kompresije, standardna devijacija (SD) za po 10 uzoraka svježeg uzorka i svakog pokusa rehidracije



**Slika 4.61** Smanjenje potrebne maksimalne sile za kompresiju uzoraka krumpira nakon sušenja i rehidracije za različite temperature i načine sušenja. [ $(F_{max})_0$ ] maksimalna sila kompresije svježih uzoraka krumpira

**Tablica 4.31** Statistička značajnost utjecaja načina sušenja i temperature sušenja na smanjenje maksimalne sile kompresije rehidratiranih uzoraka krumpira (u odnosu na svježi uzorak) prema dvofaktorijalnom pokusu - slučajni blokni raspored sa 2x4 kombinacije i 10 ponavljanja

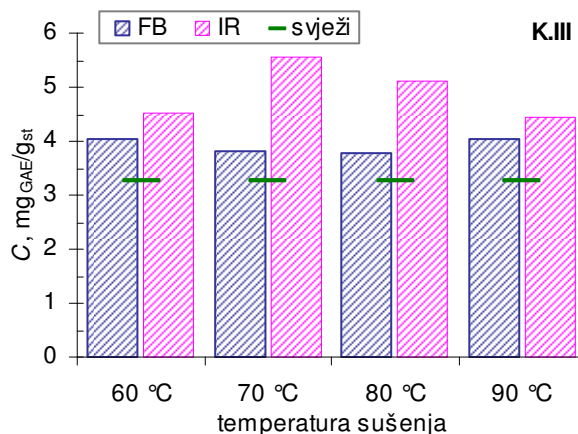
Izvor varijacije	F - koeficijent
ponavljanja	0,46 <sup>ns</sup>
način sušenja	0,00 <sup>ns</sup>
temperatura sušenja	2,69 <sup>ns</sup>
interakcija: sušenje-temperatura	6,64 <sup>**</sup>

<sup>ns</sup> nije statistički značajno

\* statistički značajno uz  $p = 0,05$

\*\* statistički značajno uz  $p = 0,01$

#### 4.3.1.5. Sadržaj ukupnih fenolnih tvari i njihova antioksidacijska aktivnost u ekstraktima krumpira



**Slika 4.62** Sadržaj ukupnih fenolnih tvari [C] u ekstraktima uzoraka svježeg i sušenog krumpira (uzorak: [K.III]; sušenje: konvekcijsko u fluidiziranom sloju [FB], radijacijsko – [IR])

**Tablica 4.32** Rezultati *t*-testa zavisnih varijabli za razlikovanje sadržaja ukupnih fenolnih tvari u ekstraktima uzoraka svježeg i sušenog krumpira

sušenje <sup>a</sup>	$\vartheta^b$	<i>t</i> - koeficijent
FB	60 °C	-5,59 **
	70 °C	-2,87 *
	80 °C	-1,84 ns
	90 °C	-3,00 *
IR	60 °C	-16,91 **
	70 °C	-38,98 **
	80 °C	-13,26 **
	90 °C	-27,90 **

<sup>ns</sup> nije statistički značajno

\* statistički značajno uz  $p = 0,05$

\*\* statistički značajno uz  $p = 0,01$

<sup>a</sup> FB - konvekcijsko u fluidiziranom sloju;

IR - radijacijsko

<sup>b</sup> temperatura sušenja

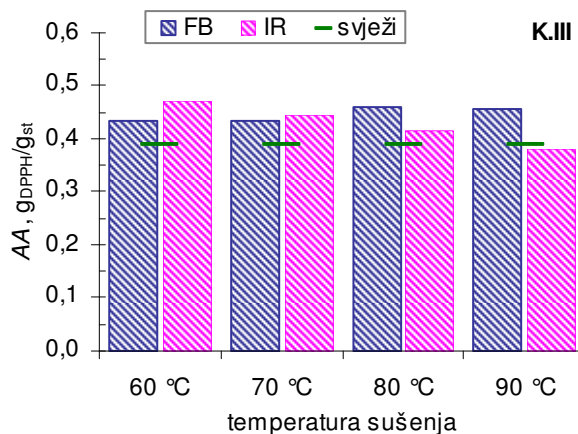
**Tablica 4.33** Statistička značajnost utjecaja načina sušenja i temperature sušenja na sadržaj ukupnih fenolnih tvari u sušenim uzorcima krumpira prema dvofaktorijalnom pokusu - slučajnom bloknom rasporedu za 2x4 kombinacije i 6 ponavljanja

Izvor varijacije	<i>F</i> - koeficijent
ponavljanja	0,56 ns
način sušenja	60,33 **
temperatura sušenja	2,67 ns
interakcija: sušenje-temperatura	6,32 **

<sup>ns</sup> nije statistički značajno

\* statistički značajno uz  $p = 0,05$

\*\* statistički značajno uz  $p = 0,01$



**Slika 4.63** Antioksidacijska aktivnost [AA] ekstrakata svježeg i sušenog krumpira (uzorak: [K .III]; sušenje: konvekcijsko u fluidiziranom sloju [FB], radijacijsko [IR])

**Tablica 4.34** Rezultati *t*-testa zavisnih varijabli za razlikovanje antioksidacijske aktivnosti ekstrakata uzoraka svježeg i sušenog krumpira

sušenje <sup>a</sup>	<i>t</i> <sup>b</sup>	<i>t</i> - koeficijent
FB	60 °C	-6,11 *
	70 °C	-9,44 *
	80 °C	-14,88 **
	90 °C	-8,50 *
IR	60 °C	-9,99 **
	70 °C	-8,26 *
	80 °C	-1,78 <sup>ns</sup>
	90 °C	0,26 <sup>ns</sup>

<sup>ns</sup> nije statistički značajno

\* statistički značajno uz  $p = 0,05$

\*\* statistički značajno uz  $p = 0,01$

<sup>a</sup> FB - konvekcijsko u fluidiziranom sloju;

IR - radijacijsko

<sup>b</sup> temperatura sušenja

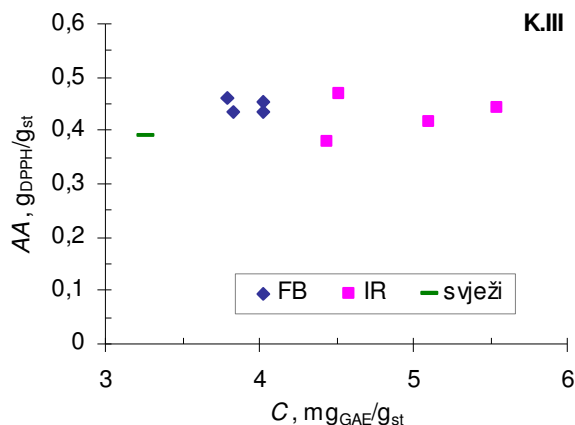
**Tablica 4.35** Statistička značajnost utjecaja načina sušenja i temperature sušenja na antioksidacijsku aktivnost ekstrakata sušenih uzoraka krumpira prema dvofaktorijskom pokusu - slučajni blokni raspored sa 2x4 kombinacije i 6 ponavljanja

Izvor varijacije	<i>F</i> - koeficijent
ponavljanja	1,34 <sup>ns</sup>
način sušenja	0,09 *
temperatura sušenja	0,05 <sup>ns</sup>
interakcija: sušenje-temperatura	8,91 *

<sup>ns</sup> nije statistički značajno

\* statistički značajno uz  $p = 0,05$

\*\* statistički značajno uz  $p = 0,01$

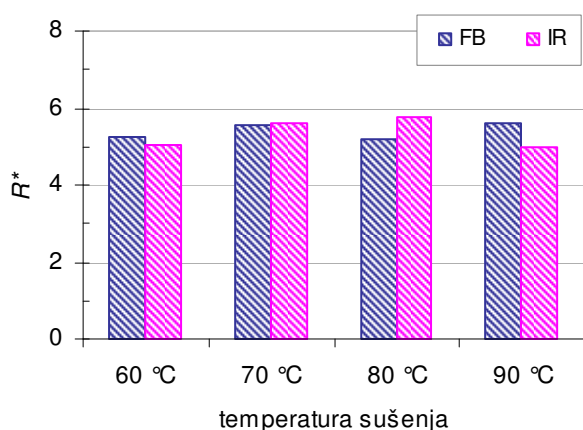


**Slika 4.64** Međusoban odnos sadržaja ukupnih fenolnih tvari [C] i antioksidacijske aktivnosti [AA] u ekstraktima svježeg i sušenih uzoraka krumpira (uzorak: [K.III]) – podaci za oba načina (konvekcijsko u fluidiziranom sloju [FB], radijacijsko [IR]) sušenja i sve temperature sušenja. Koeficijent korelacije: 0,1343

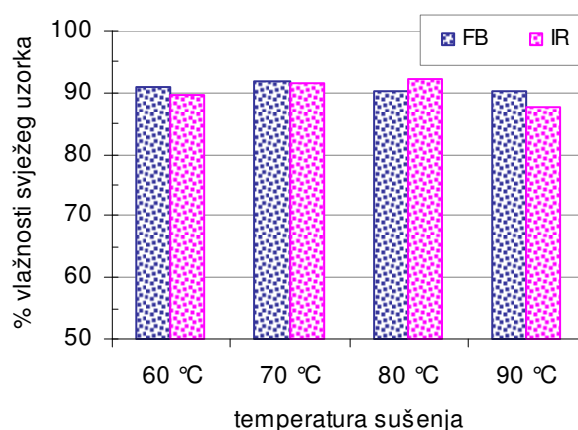
#### 4.3.2. Mrkva

##### 4.3.2.1. Rehidracijska svojstva sušenih uzoraka mrkve

Rehidracijska svojstva uzoraka mrkve sušenih do 10% (wb) udjela vlage prikazana su rehidracijskim omjerom ( $R^*$ ), a rehidracijski doseg prikazan je kao postotak vlažnosti svježeg uzorka krumpira (prije sušenja) u ovisnosti o temperaturi sušenja i načinu sušenja te je analizom varijance procijenjen njihov utjecaj na doseg rehidracije.



**Slika 4.65** Rehidracijski omjer ( $R^*$ ) uzoraka mrkve u ovisnosti o temperaturi sušenja i načinu sušenja (konvekcijsko sušenje uz fluidizaciju [FB]; infracrveno sušenje [IR])



**Slika 4.66** Utjecaj temperature sušenja na doseg rehidracije uzoraka mrkve sušenih konvekcijski u fluidizirajućem sloju [FB] i infracrvenim načinom sušenja [IR]

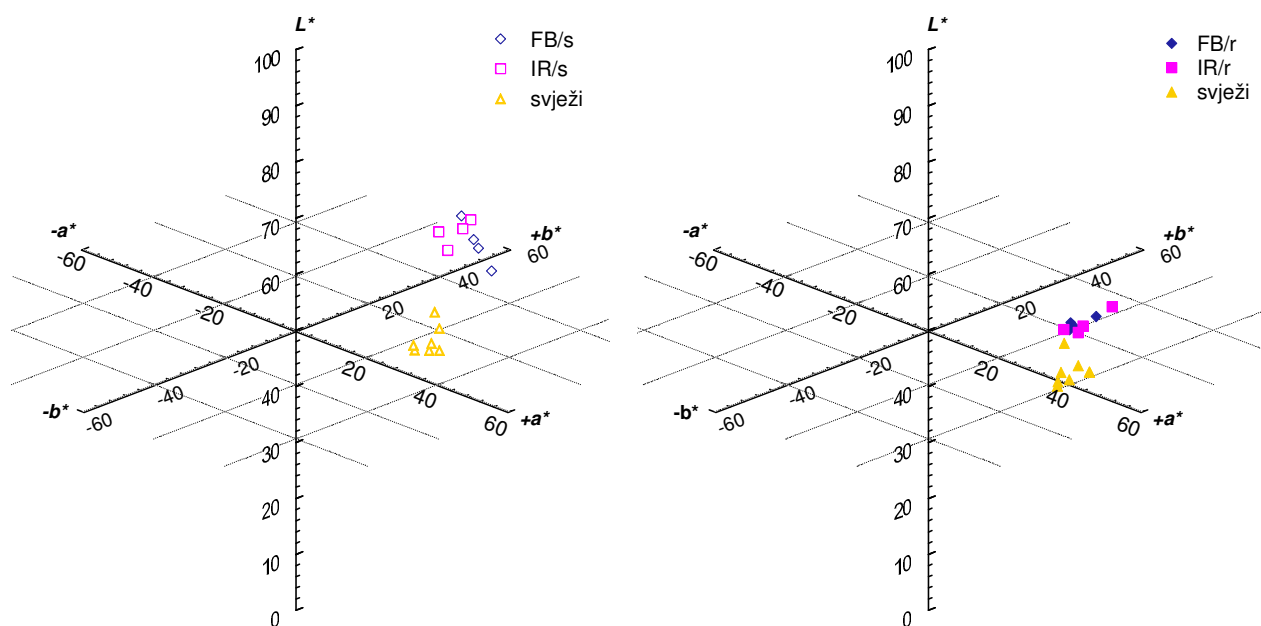


**Tablica 4.36** Statistička značajnost ( $F$ -test) utjecaja načina sušenja i temperature sušenja na doseg rehidracije uzorka mrkve prema dvofaktorijalnom pokusu - slučajnom bloknom rasporedu za 2x4 kombinacije i 6 ponavljanja

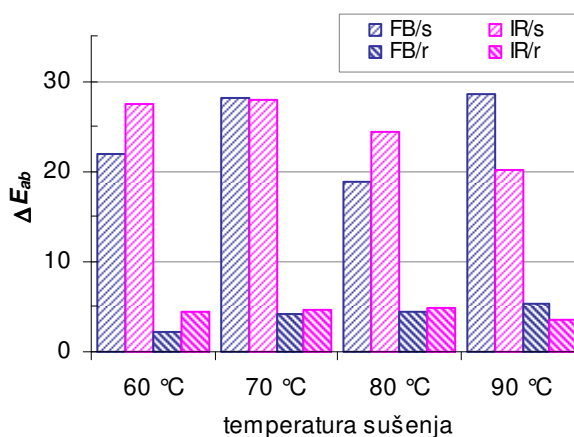
Izvor varijacije	$F$ - koeficijent
ponavljanja	0,04 <sup>ns</sup>
način sušenja	3,25 <sup>ns</sup>
temperatura sušenja	16,69 <sup>**</sup>
interakcija: sušenje-temperatura	11,22 <sup>**</sup>

<sup>ns</sup> nije statistički značajno  
 \* statistički značajno uz  $p = 0,05$   
 \*\* statistički značajno uz  $p = 0,01$

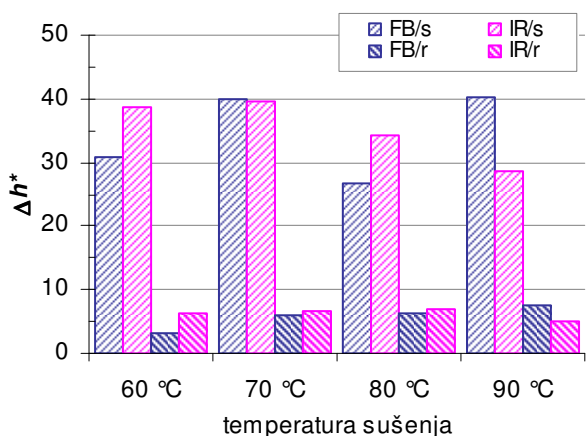
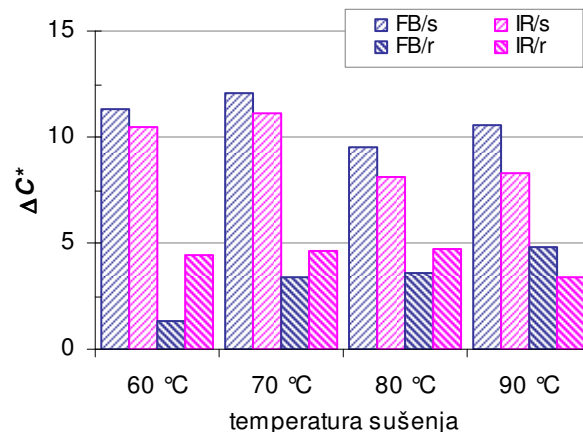
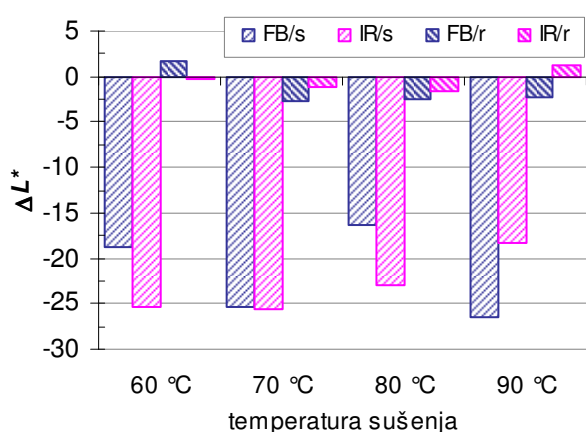
#### 4.3.2.2. Boja svježih, sušenih i rehidratiranih uzoraka mrkve



**Slika 4.67** Parametri CIE- $L^*a^*b^*$  sistema boje [ $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ ] za svježe [svježi], sušene [s] i rehidratirane [r] uzorke mrkve (uzorak: M.III) - podaci za oba načina sušenja (konvekcijsko u fluidiziranom sloju [FB], radijacijsko [IR]) i sve temperature sušenja [(60, 70, 80, 90) °C]



**Slika 4.68** Vrijednosti ukupne promjene boje sušenih [s] i rehidratiranih [r] uzoraka mrkve (u odnosu na svježi uzorak (M.III) mrkve) u ovisnosti o temperaturi sušenja za dva različita načina sušenja (konvekcijsko u fluidiziranom sloju [FB], radijacijsko [IR])



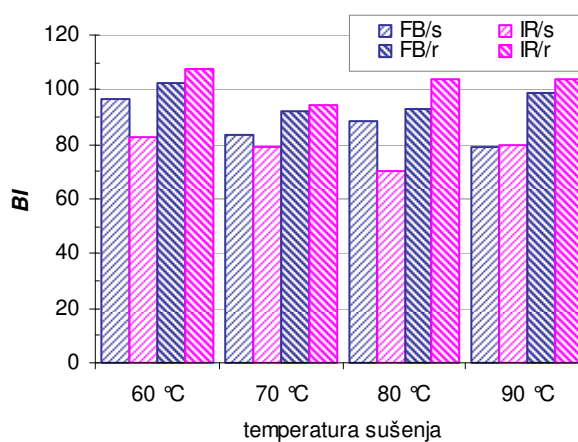
promatrani odnos promjena svojstava boje	koeficijent korelacije
$\Delta E_{ab} : \Delta L^*$	-0,9973
$\Delta E_{ab} : \Delta C^*$	0,9556
$\Delta E_{ab} : \Delta h^*$	1,0000

**Slika 4.69** Promjene osnovnih svojstava boje mrkve (uzorak: K.III) uzrokovana sušenjem i rehidracijom ovisno o temperaturi sušenja i načinu sušenja, i njihova korelacija s ukupnom promjenom boje. ( $[\Delta L^*]$  promjena svjetline,  $[\Delta C^*]$  promjena kromatičnosti,  $[\Delta h^*]$  promjena tona,  $[\Delta E_{ab}]$  ukupna promjena boje; uzorci: svježi [svježi], sušeni [s], rehidratirani [r]; način sušenja: konvekcijsko u fluidiziranom sloju [FB], radijacijsko [IR])

**Tablica 4.37** Statistička značajnost ( $F$ -test) utjecaja načina sušenja i temperature sušenja na ukupnu promjenu boje ( $\Delta E_{ab}$ ) sušenih i rehidratiranih uzoraka mrkve prema dvofaktorijalnom pokusu - slučajni blokni raspored sa 2x4 kombinacije i 3 ponavljanja (tj. minimalna, maksimalna i srednja vrijednost 10 mjerenja)

Izvor varijacije	$F$ - koeficijent	
	sušeni uzorci	rehidratirani uzorci
ponavljanja	2,73 <sup>ns</sup>	2,21 <sup>ns</sup>
način sušenja	0,24 <sup>ns</sup>	0,42 <sup>ns</sup>
temperatura sušenja	11,87 <sup>**</sup>	1,40 <sup>ns</sup>
interakcija: sušenje-temperatura	20,75 <sup>**</sup>	1,18 <sup>ns</sup>

<sup>ns</sup> nije statistički značajno  
 \* statistički značajno uz  $p = 0,05$   
 \*\* statistički značajno uz  $p = 0,01$



**Slika 4.70** Vrijednosti indeksa posmeđivanja [ $BI$ ] sušenih [s] i rehidratiranih [r] uzoraka mrkve (uzorak: M.III) u ovisnosti o temperaturi sušenja za dva različita načina sušenja (konvekcijsko u fluidiziranom sloju [FB], radijacijsko [IR])

**Tablica 4.38** Statistička značajnost ( $F$ -test) utjecaja načina sušenja i temperature sušenja na stupanj posmeđivanja (izražen kao  $BI/BI_0$ )<sup>a</sup> sušenih i rehidratiranih uzoraka mrkve prema dvofaktorijalnom pokusu - slučajni blokni raspored sa 2x4 kombinacije i 3 ponavljanja (tj. minimalna, maksimalna i srednja vrijednost 10 mjerenja)

Izvor varijacije	$F$ - koeficijent	
	sušeni uzorci	rehidratirani uzorci
ponavljanja	2,21 <sup>ns</sup>	3,31 <sup>ns</sup>
način sušenja	162,48 <sup>**</sup>	12,81 <sup>**</sup>
temperatura sušenja	63,54 <sup>**</sup>	0,64 <sup>ns</sup>
interakcija: sušenje-temperatura	91,41 <sup>**</sup>	0,88 <sup>ns</sup>

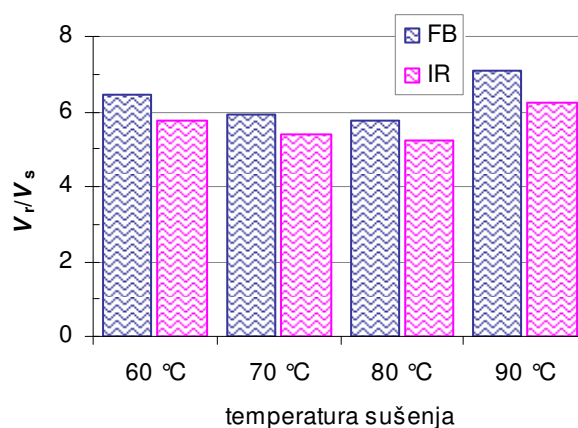
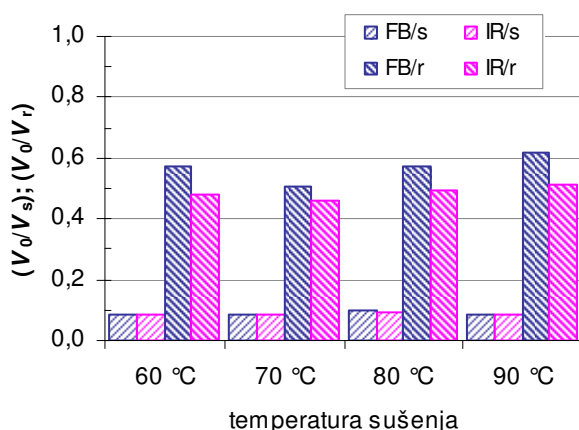
<sup>ns</sup> nije statistički značajno  
 \* statistički značajno uz  $p = 0,05$   
 \*\* statistički značajno uz  $p = 0,01$   
<sup>a</sup> indeks posmeđivanja: svježeg uzorka -  $BI_0$ , nakon sušenja/rehidratacije -  $BI$

## 4.3.2.3. Volumen svježih, sušenih i rehidratiranih uzoraka mrkve

**Tablica 4.39** Prosječne vrijednosti određenih volumena (ml) svježih, sušenih i rehidratiranih uzoraka mrkve

Temperatura sušenja		Konvekcijsko sušenje u fluidiziranom sloju				Radijacijsko sušenje			
		60 °C	70 °C	80 °C	90 °C	60 °C	70 °C	80 °C	90 °C
Uzorak	svježi	1,08	1,17	1,06	0,98	1,08	1,17	1,06	0,97
	sušeni	0,09	0,10	0,11	0,09	0,09	0,10	0,10	0,08
	rehidratirani	0,62	0,59	0,61	0,60	0,52	0,54	0,52	0,50

U tablici su prikazane srednje vrijednosti volumena određenih za po 10 uzoraka svakog pokus, uz maksimalnu standardnu devijaciju: SD < 0,08



**Slika 4.71** Ovisnost omjera prosječnih volumena svježih [ $V_0$ ] i sušenih [ $V_s$ ], odnosno rehidratiranih [ $V_r$ ] uzoraka mrkve (uzorak: M.III) o temperaturi sušenja za oba načina sušenja [FB; IR]

**Slika 4.72** Omjer prosječnih volumena uzoraka mrkve (uzorak: M.III) nakon [ $V_r$ ] i prije [ $V_s$ ] rehidratacije za različite temperature sušenja i načine sušenja [FB – konvekcijsko sušenje u fluidiziranom sloju; IR – infracrveno sušenje]

**Tablica 4.402** Statistička značajnost ( $F$ -test) utjecaja načina sušenja i temperature sušenja na promjenu volumena sušenih i rehidratiranih uzoraka mrkve (izraženo kao  $V/V_0$ )<sup>a</sup> prema dvofaktorijalnom pokusu - slučajni blokni raspored sa 2x4 kombinacije i 3 ponavljanja (tj. minimalnom, maksimalnom i srednjom vrijednosti 10 mjerenja)

Izvor varijacije	$F$ - koeficijent	
	sušeni uzorci	rehidratirani uzorci
ponavljanja	0,39 <sup>ns</sup>	3,07 <sup>ns</sup>
način sušenja	14,72 <sup>ns</sup>	119,16 <sup>**</sup>
temperatura sušenja	37,62 <sup>**</sup>	24,64 <sup>**</sup>
interakcija: sušenje-temperatura	3,04 <sup>**</sup>	2,68 <sup>ns</sup>

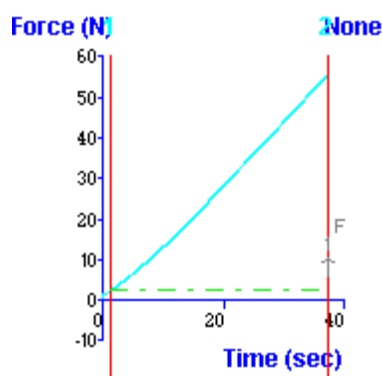
<sup>ns</sup> nije statistički značajno

\* statistički značajno uz  $p = 0,05$

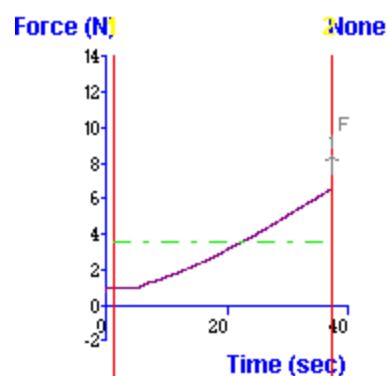
\*\* statistički značajno uz  $p = 0,01$

<sup>a</sup> volumen: svježeg uzorka -  $V_0$ , nakon sušenja/rehidratacije –  $V$

## 4.3.2.4. Teksturalna svojstva svježih, sušenih i rehidratiranih uzoraka mrkve



**Slika 4.73** Dijagram ovisnosti sile i vremena jednosmjerne kompresije svježeg uzorka mrkve (10 ponavljanja)

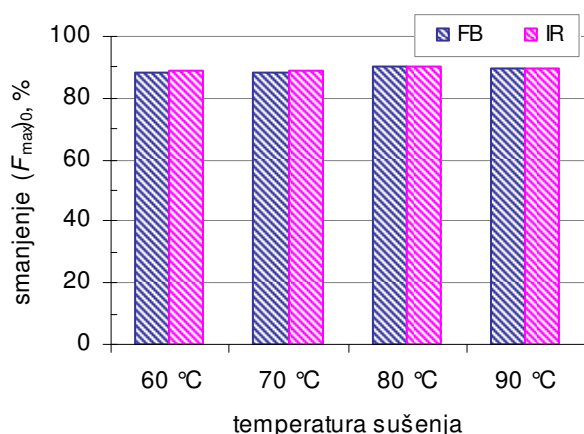


**Slika 4.74** Primjer tipičnih krivulja ovisnosti sile kompresije o vremena jednosmjerne kompresije rehidratiranih uzorka mrkve (prethodno sušenih konvekcijskim načinom u fluidiziranom sloju pri 70 °C )

**Tablica 4.41** Vrijednosti maksimalne [ $F_{max}$ , N] i srednje [ $F_{mean}$ , N] sile potrebne za 15%-tnu kompresiju svježih uzoraka i rehidratiranih (prethodno sušenih) uzoraka mrkve

Temperatura sušenja		Svježi uzorak	Konvekcijsko sušenje u fluidiziranom sloju				Radijacijsko sušenje			
			60 °C	70 °C	80 °C	90 °C	60 °C	70 °C	80 °C	90 °C
$F_{max}$	$(F_{max})_{sr}$ , N	53,23	6,35	6,12	5,04	5,59	5,96	6,06	5,05	5,39
	SD	2,89	0,48	0,54	0,50	0,56	1,18	0,71	0,49	0,91
$F_{mean}$	$(F_{mean})_{sr}$ , N	26,22	3,20	3,07	2,49	2,82	3,19	3,11	2,56	2,94
	SD	2,81	0,29	0,55	0,27	0,39	0,83	0,60	0,28	1,12

U tablici su prikazane srednje vrijednosti maksimalne i srednje sile kompresije, standardna devijacija (SD) za po 10 uzoraka svježeg uzorka i svakog pokusa rehidratacije



**Slika 4.75** Smanjenje potrebne maksimalne sile za kompresiju uzoraka mrkve nakon sušenja i rehidratacije za različite temperature i načine sušenja. [ $(F_{max})_0$ ] maksimalna sila kompresije svježih uzoraka mrkve)

**Tablica 4.42** Statistička značajnost utjecaja načina sušenja i temperature sušenja na smanjenje maksimalne sile kompresije rehidratiranih uzoraka mrkve (u odnosu na svježi uzorak) prema dvofaktorijalnom pokusu - slučajni blokni raspored sa 2x4 kombinacije i 10 ponavljanja

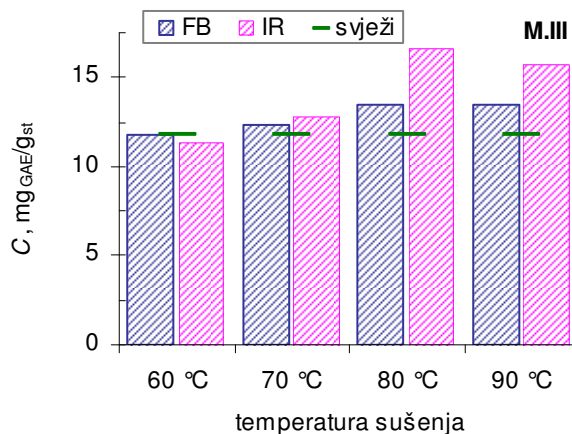
Izvor varijacije	F - koeficijent
ponavljanja	0,70 <sup>ns</sup>
način sušenja	1,00 <sup>ns</sup>
temperatura sušenja	10,61 <sup>**</sup>
interakcija: sušenje-temperatura	0,28 <sup>ns</sup>

<sup>ns</sup> nije statistički značajno

\* statistički značajno uz  $p = 0,05$

\*\* statistički značajno uz  $p = 0,01$

#### 4.3.2.5. Sadržaj ukupnih fenolnih tvari i njihova antioksidacijska aktivnost u ekstraktima mrkve



**Slika 4.76** Sadržaj ukupnih fenolnih tvari [C] u ekstraktima uzoraka svježe i sušene mrkve (uzorak: [M .III]; sušenje: konvekcijsko u fluidiziranom sloju [FB], radijacijsko [IR])

**Tablica 4.43** Rezultati *t*-testa zavisnih varijabli za razlikovanje sadržaja ukupnih fenolnih tvari u ekstraktima uzoraka svježe i sušene mrkve

sušenje <sup>a</sup>	$\bar{x}$ <sup>b</sup>	<i>t</i> - koeficijent
FB	60 °C	-5,22 *
	70 °C	-10,18 **
	80 °C	-12,04 **
	90 °C	-9,36 *
IR	60 °C	-16,68 **
	70 °C	-17,64 **
	80 °C	-17,17 **
	90 °C	-40,87 **

<sup>ns</sup> nije statistički značajno

\* statistički značajno uz  $p = 0,05$

\*\* statistički značajno uz  $p = 0,01$

<sup>a</sup> FB - konvekcijsko u fluidiziranom sloju;

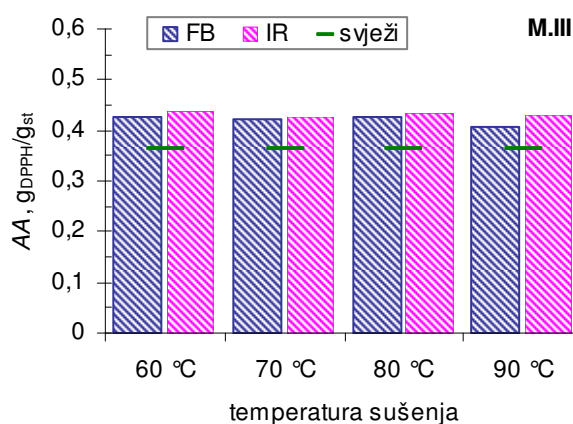
IR - radijacijsko

<sup>b</sup> temperatura sušenja

**Tablica 4.44** Statistička značajnost utjecaja načina sušenja i temperature sušenja na sadržaj ukupnih fenolnih tvari u sušenim uzorcima mrkve prema dvofaktorijalnom pokusu - slučajni blokni raspored sa 2x4 kombinacije i 6 ponavljanja

Izvor varijacije	F - koeficijent
ponavljanja	2,70 <sup>ns</sup>
način sušenja	24,29 <sup>**</sup>
temperatura sušenja	4,10 <sup>*</sup>
interakcija: sušenje-temperatura	2,57 <sup>ns</sup>

<sup>ns</sup> nije statistički značajno  
<sup>\*</sup> statistički značajno uz  $p = 0,05$   
<sup>\*\*</sup> statistički značajno uz  $p = 0,01$



**Slika 4.77** Antioksidacijska aktivnost [AA] ekstrakata svježe i sušene mrkve (uzorak: [M.III]; sušenje: [FB] - konvekcijsko u fluidiziranom sloju, [IR] – radijacijsko)

**Tablica 4.45** Rezultati *t*-testa zavisnih varijabli za razlikovanje antioksidacijske aktivnosti ekstrakata uzoraka svježeg i sušenog krumpira

sušenje <sup>a</sup>	$\vartheta^b$	<i>t</i> - koeficijent
FB	60 °C	5,60 <sup>**</sup>
	70 °C	10,64 <sup>**</sup>
	80 °C	12,14 <sup>**</sup>
	90 °C	9,41 <sup>**</sup>
IR	60 °C	15,95 <sup>**</sup>
	70 °C	16,41 <sup>**</sup>
	80 °C	16,46 <sup>**</sup>
	90 °C	29,79 <sup>**</sup>

<sup>ns</sup> nije statistički značajno  
<sup>\*</sup> statistički značajno uz  $p = 0,05$   
<sup>\*\*</sup> statistički značajno uz  $p = 0,01$   
<sup>a</sup> FB - konvekcijsko u fluidiziranom sloju;  
 IR - radijacijsko  
<sup>b</sup> temperatura sušenja

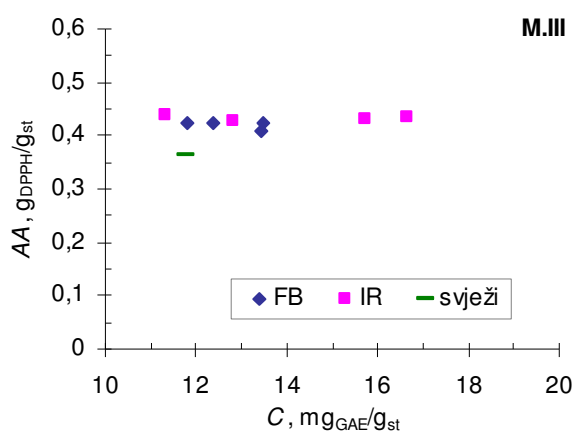
**Tablica 4.46** Statistička značajnost utjecaja načina sušenja i temperature sušenja na antioksidacijsku aktivnost ekstrakata sušenih uzoraka krumpira prema dvofaktorijalnom pokusu - slučajnom bloknom rasporedu za 2x4 kombinacije i 6 ponavljanja

Izvor varijacije	F - koeficijent
<i>ponavljanja</i>	2,68 <sup>ns</sup>
<i>način sušenja</i>	24,48 <sup>**</sup>
<i>temperatura sušenja</i>	4,14 <sup>*</sup>
<i>interakcija: sušenje-temperatura</i>	2,71 <sup>ns</sup>

<sup>ns</sup> nije statistički značajno

<sup>\*</sup> statistički značajno uz  $p = 0,05$

<sup>\*\*</sup> statistički značajno uz  $p = 0,01$



**Slika 4.78** Međusoban odnos sadržaja ukupnih fenolnih tvari [C] i antioksidacijske aktivnosti [AA] u ekstraktima svježe i sušene mrkve (uzorak: [M.III]) – podaci za oba načina sušenja (konvekcijsko u fluidiziranom sloju [FB], radijacijsko [IR]) i sve temperature sušenja [(60, 70, 80, 90) °C]. Koeficijent korelacije: 0,3351



## **5. RASPRAVA**

U ovom radu provedeno je istraživanje kinetike sušenja krumpira i mrkve u laboratorijskim uvjetima, kao i kinetike rehidracije sušenog povrća. Rad je imao nekoliko postavljenih zadataka:

- matematičko modeliranje kinetike sušenja različitim matematičkim modelima,
- određivanje koeficijenta efektivne difuzije iz parametara odabranih modela,
- ispitivanje utjecaja temperature sušenja i načina dovođenja topline materijalu na kinetiku sušenja i efektivni koeficijent difuzije vlage tijekom sušenja i rehidracije povrća, te
- procjenu promjena određenih kvalitativnih svojstava povrća uzrokovanih sušenjem, odnosno rehidracijom.

Mrkva i krumpir, odabrani su kao prehrambeni materijal za ovo istraživanje, jer spadaju u povrće koje se (globalno promatrano) najraširenije i najčešće uzgaja i konzumira, kao i zbog činjenice da predstavljaju higroskopne materijale koji tijekom sušenja značajno ne mijenjaju svoju poroznost [6]. Prije sušenja, povrće je očišćeno i usitnjeno na ujednačene komadiće dimenzija  $\sim (15 \times 15 \times 5)$  mm te je sušeno bez dodatne fizikalne ili kemijske obrade što je zadovoljavalo ostvarivanje postavljenih zadataka.

Rasprava je koncipirana tako da je prvo načinjen osvrt na kinetiku sušenja i primjenjivost matematičkih modela za opisivanje kinetike sušenja, potom su na isti način komentirani rezultati rehidracije, a nakon toga su razmatrani rezultati procjene efektivnog koeficijenta difuzivnosti vlage tijekom oba procesa. Na kraju su komentirane i promjene kvalitativnih svojstava povrća.

## 5.1. Sušenje povrća

Konvekcijsko sušenje u fluidiziranom sloju (engl. *fluid bed drying* – FB) i infracrveno (radijacijsko) sušenje (engl. *infrared drying* – IR) odabrani su za provedbu pokusa sušenja jer se smatraju relativno brzim i prikladnim metodama sušenja termo-osjetljivih materijala [88, 94, 97, 139], a međusobno se razlikuju prema mehanizmu zagrijavanja materijala, odnosno mehanizmima izmjene topline i tvari koji se odvijaju unutar sušionika. Kako je temperatura sušenja (uz vlažnost i strukturu materijala) parametar sa značajnim utjecajem na kinetiku sušenja, te uz vrijeme sušenja bitno utječe na promjene materijala, sušenje povrća u oba tipa sušionika provedeno je pri četiri različite temperature sušenja (60 °C, 70 °C, 80 °C, 90 °C). Tijekom sušenja mjerena je masa (vlažnog) materijala, koja je preračunata u vlažnost materijala ( $X$ ,  $\text{kg}_v/\text{kg}_{st}$ ) (izraženu na suhu bazu) i izražena kao bezdimenzionalna vlažnost ( $\Phi$ ) poslužila za izradu kinetičkih krivulja sušenja. Na ovaj način bilo je omogućeno jednostavnije i preciznije

uspoređivanje svih dobivenih rezultata, odnosno određivanje utjecaja temperature i načina sušenja na kinetiku sušenja različitih uzoraka ispitivanih materijala, kao i matematičko modeliranje kinetike.

Krivulje sušenja, za po dva različita uzorka (I, II) krumpira (*Slika 4.1*) i mrkve (*Slika 4.8*) sušena konvekcijskim načinom u fluidiziranom sloju, kao i istih materijala – krumpira (*Slika 4.4*) i mrkve (*Slika 4.11*) sušenih infracrvenim načinom sušenja, karakteristične su krivulje sušenja prehrambenih materijala kojima dominira period padajuće brzine sušenja, bez jasno izraženog perioda konstantne brzine sušenja što ukazuje na difuziju kao prevladavajući mehanizam transporta vlage [38]. Krivulje IR sušenja obje vrste povrća nešto su „položnije“ i „duže“ u odnosu na krivulje FB sušenja što upućuje na dugotrajniji proces sušenja, dok je za oba načina sušenja i obje vrste povrća vidljivo da je s povišenjem temperature sušenja potrebno vrijeme sušenja bilo kraće.

Temperatura povrća mjerna je u sredini po jednog uzorka (komadića) povrća tijekom svakog pokusa IR sušenja što je, s obzirom na debljinu uzorka (5 mm), približno konstantne uvijete sušenja i zanemariv unutrašnji temperaturni gradijent [18], bilo zadovoljavajuće za opisivanje temperaturne ovisnost o vremenu sušenja, odnosno o vlažnosti materijala (*Slike 4.5* i *4.12*) za određene uvjete sušenja. Na samom početku sušenja (period zagrijavanja), temperatura materijala se naglo povećavala ovisno o temperaturi sušenja, a potom se s daljnjim smanjivanjem vlažnosti materijala povećavala postepeno, da bi nakon uklanjanja (isparavanja) ~ 90% početne vlažnosti dolazilo do ponovnog naglog porasta temperature prema zadanoj temperaturi sušenja. Početni nagli porast temperature materijala posljedica je intenzivne izmjene osjetne topline uslijed direktnog kontakta IR (toplinskih) zraka s površinom materijala i njihovog direktnog „plitkog“ prodiranja u unutrašnjost materijal, pri čemu je brzina uklanjanja vlage iz materijala mala. Daljnji porast temperature bio je usporen vjerojatno zbog istodobnog zagrijavanja materijala i intenzivnijeg isparavanja vlage (iz materijala i unutar materijala) uz stvaranje graničnog filma oko materijala, koji je relativno zasićen vlagom što je usporavalo prijenos topline i tvari. Uklanjanjem glavne vlage iz materijala ( $\Phi < 0,1$ ) ovi utjecaji slabe i temperatura se u materijalu ponovno naglo povećava [93]. Sličan tijek promjene temperature bilježe Afzal i Abe [21] kod kombiniranog konvekcijsko-radijacijskog sušenja krumpira, a Toğrul i Pehlivan [24] smatraju ga karakterističnim pokazateljem difuzije kao glavnog mehanizma uklanjanja vlage.

### 5.1.1. Matematičko modeliranje kinetike sušenja

Za matematičko modeliranje kinetike odabrani su jednočlani modeli, koji su u literaturi već korišteni za opisivanje kinetike sušenja u tankom sloju vrlo različitih materijala uz primjenu različitih načina i režima sušenja. Ovi modeli sadrže mali broj parametara (1 ili 2), koji predstavljaju određene konstante sušenja karakteristične za taj model, iz kojih je (prema literaturi) moguće odrediti/izračunati efektivni difuzijski koeficijent. Prema dobivenim eksperimentalnim rezultatima i primjenom metode matematičke regresije procijenjeni su parametri odabranih modela kako slijedi:

- Fickov /pojednostavljeni/ model (eksponencijalni jednoparametarski –  $K_F$ ),
- Lewisov model (eksponencijalni jednoparametarski -  $K_L$ ),
- Pageov model (eksponencijalni dvoparametarski -  $k, n$ ),
- model Sander (modifikacija Page modela, eksponencijalni dvoparametarski -  $t_k, n$ ),
- modificirani Page model (eksponencijalni dvoparametarski -  $k', n'$ ),
- Pelegov model (ne-eksponencijalni dvoparametarski –  $K_1, K_2$ ),
- Henderson-Pabisov model (eksponencijalni dvoparametarski –  $G, S$ ).

Osim navedenih matematičkih modela predložen je i korišten novi model, koji predstavlja modifikaciju Henderson-Pabisova modela uvođenjem trećeg parametra (eksponent vremena,  $N$ ) u model te pokazuje sličnosti s matematičkim modelom (2.12), ali bez zadanih ograničenja za vrijednosti njegovih parametra:

- modificirani Henderson-Pabis model (eksponencijalni troparametarski –  $G', S', N$ ).

Prikladnost matematičkog modela za opisivanje svakog pokusa sušenja potvrđivala se korištenjem statističkih pokazatelja uspješnosti aproksimacije, a primijenjeni su: koeficijent korelacije [132], ukupno kvadratno odstupanje (FL), srednje apsolutno odstupanje (MEB), srednje kvadratno odstupanje (RMSE), reducirani chi-kvadrat ( $\chi^2$ ), srednja relativna pogreška (E%) te efikasnost modela (EF). Potpuno (idealno) slaganje između eksperimentalnih i modelom predviđenih vrijednosti bilo bi potvrđeno s vrijednostima 1 za parametre R i EF, odnosno s vrijednostima 0 za svaki ostali navedeni statistički parametar. Za praktične slučajeve poželjne su vrijednosti  $\sim 1$ , odnosno  $\sim 0$  pri čemu parametra MEB može imati pozitivnu ili negativnu vrijednost, a vrijednosti  $E\% < 5\%$  označavaju odlično, a  $E\% > 10\%$  loše slaganje eksperimentalno određenih i predviđenih vrijednosti [140].

Za numeričke aproksimacije eksperimentalnih podataka u ovom radu dobivene su vrlo visoke vrijednosti koeficijenta korelacije u rasponu 0,9353-0,9999, dok su vrijednosti ukupnog

kvadratnog odstupanja bile zadovoljavajuće male u rasponu 2,4410-0,0004 za sve matematičke modele i za sve pokuse sušenja, bez obzira na uzorak povrća, temperaturu i način sušenja (*Tablice 4.1-4*). Vrijednosti ostalih statističkih parametra (radi bolje preglednosti) prikazane su histogramima (*Slike 4.2-3, 4.6-7, 4.9-10, 4.13-14*), koji pokazuju zamjetnu razliku između pojedinih modela. Može se uočiti da je novopredložena modifikacija Henderson-Pabis modela (za oba načina sušenja svakog uzoraka krumpira i mrkve bez obzira na temperaturu sušenja) imala najveće EF vrijednosti (0,9927 - 0,9996) i najniže vrijednosti MEB (- 0,0026 – 0,0017), RMSE (0,0025 – 0,0115),  $\chi^2$  (0,0000 – 0,0001) i E% (1,58 – 9,71). Visoko zadovoljavajućim pokazao se i Pageov model zajedno s njegovim modifikacijama (model Sander i modificirani Page model), koji su već potvrđeno prikladni modeli za opisivanje kinetike sušenja različitih materijala pri raznim uvjetima sušenja [25, 36, 37, 39-43]. Ne-eksponencijalni Pelegov model također je imao dobro slaganje s mjerenim vrijednostima, potom slijede Henderson-Pabisov model i Lewisov model, dok je najmanje povoljnu aproksimaciju davao pojednostavljeni Fickov model. *Slika 4.15* konkretan je prikaz dobrog slaganja mjerenih i modelima (modificirani Henderson-Pabis, Page) izračunatih vrijednosti promjene vlažnosti povrća tijekom sušenja za neke od provedenih pokusa.

Bez obzira na statističke pokazatelje stupnja slaganja mjerenih i izračunatih podataka, za daljnje razmatranje u obzir su uzeti regresijski procijenjeni parametri svih odabranih modela jer, prema literaturnim izvorima oni objedinjuju prijenosna svojstva te se mogu koristiti za relativno jednostavnu procjenu određenog prijenosnog svojstva, odnosno u ovom slučaju koeficijenta efektivne difuzije. Vrijednosti procijenjenih parametar za svaki provedeni pokus sušenja dane su u *tablicama 4.1-4*. *Slike 4.16* i *4.18* prikazuju ovisnost procijenjenih parametara modela (koji u sebi sadrže dimenziju vremena) o temperaturi sušenja i načinu sušenja, a iz njih je vidljivo da su pojedini parametri (različitih matematičkih modela) grupirani bez obzira na način sušenja i vrstu povrća. Parametri Fickova ( $K_F$ ), Lewisova ( $K_L$ ) i modificiranog Pageova modela ( $k'$ ) imali su vrlo bliske vrijednosti i linearnu ovisnost o temperaturi sušenja za oba načina sušenja i obje vrste povrća. Na sličan način, drugu skupinu čine parametri Henderson-Pabisova [69], Pageova [47] i modificiranog Henderson-Pabisova modela ( $S'$ ) čija je ovisnost o temperaturi sušenja bila linearna kod FB sušenja, a blago eksponencijalna kod IR sušenja za obje vrste povrća. Analognu ovisnost o temperaturi i načinu sušenja pokazuje i recipročna vrijednost Pelegove konstante brzine sušenja ( $1/K_1$ ), ali s nešto drugačijim vrijednostima.

*Slike 4.17* i *4.19* prikazuju vrijednosti procijenjenih bezdimenzionalnih parametara Pageova [125], modificiranog Pageova ( $n'$ ), Henderson-Pabisova [69] i modificiranog Henderson-Pabis ( $S', N$ ) modela u ovisnosti o temperaturi sušenja za oba načina sušenja. Vidljivo je da

temperatura sušenja nije imala značajnijeg utjecaja na ove parametre, dok je način sušenja, tj. način zagrijavanja materijala imao utjecaja na njihove vrijednosti što je uočeno i u istraživanjima drugih istraživača [141].

Obzirom na to da su se modificirani Henderson-Pabisovov model i Pageov model pokazali najprikladnijima za opisivanje kinetike sušenja krumpira i mrkve u primijenjenim eksperimentalnim uvjetima, provedena je i statistička ocijenjena značajnosti utjecaja pojedinog faktora pokusa na njihove parametre, kao i za Henderson-Pabisov model radi usporedbe s predloženom modifikacijom tog modela (*Tablica 4.5*). Na taj način, potvrđeno je da nije postojala opravdana razlika između različitih uzoraka iste vrste povrća, dok su vrijednosti svih parametara modela značajno ovisili o načinu sušenja. Zabilježena je i izražena ovisnost parametara  $k$ ,  $S$  i  $S'$  o temperaturi sušenja (kod obje vrste povrća) što je i očekivano s obzirom da su navedeni parametri povezani s prijenosom topline i tvari. Također je djelomično potvrđeno međuovisno djelovanje temperature sušenja i načina sušenja, što upućuje na drugačiju ovisnost tih parametara o temperaturi sušenja kod FB sušenja u odnosu na IR sušenje.

Funkcionalne ovisnosti parametara modificiranog Henderson-Pabis model o temperaturi sušenja (*Tablica 4.6*) korištene su za procjenu vremena potrebnog za sušenje (nove šarže) svježih uzoraka svježeg povrća do 10%-tnog udjela vode pri jednakim eksperimentalnim uvjetima. Uvrštavanjem dobivenih temperaturnih ovisnosti parametara u matematičke modela (*Tablica 4.7*) ostvarena je mogućnost simulacije kinetike sušenja (*Slike 4.20-21*). Simulacija je prikazana sa po pet krivulja brzine sušenja od kojih po dvije odgovaraju temperaturama sušenja primijenjenim u pokusima sušenja, a preostale proizvoljno odabranim temperaturama sušenja. Iz navedenih slika je vidljivo da je slaganje simulacijskih krivulja brzine sušenja s eksperimentalnim podacima  $(-\Delta\Phi/\Delta t)/\Phi$  zadovoljavajuće ( $E\% < 5\%$ ). Krivulje brzine sušenja potvrđuju potpuni izostanak perioda konstantne brzine sušenja i upućuju na difuzijski prijenos mase s obzirom da, prema Douili i suradnicima [20], oblik krivulja brzine sušenja može pomoći u dijagnosticiranju i mehanizma sušenja. Linearni oblik (ravna linija) krivulje brzine sušenja (ovisnost brzine sušenja o vlažnosti materijala) ukazuje na transport vlage pod utjecajem kapilarnih sila, dok difuzijski mehanizam može biti prepoznat po parabolnom obliku krivulje jer je vrijeme potrebno za određeni stupanj smanjenja vlažnosti materijala povezano s kvadratom debljine uzorka materijala.

Nadalje se može uočiti da su se brzina sušenja i vrijeme trajanja sušenja potrebnog za dostizanje jednake vlažnosti istovrsnog materijal razlikovali s obzirom na temperaturu sušenja i način sušenja, pri čemu je viša temperatura sušenja imala pozitivan utjecaj na povećanje brzine sušenja i skraćivanje vremena sušenja. Međusobnim (vizualnim) uspoređivanjem tijeka ovih krivulja

uočava se veća razlika između krivulja različitih načina sušenja nego krivulja brzine sušenja različitog povrća. Obzirom da su parametri modela  $n$  (Page) i  $N'$  (modificirani Henderson-Pabis) za FB sušenje uglavnom imali vrijednosti  $< 1$ , prema izrazima (4.1) i (4.2) brzina sušenja u vremenu  $t = 0$ , nije bila jednaka 0, te krivulje sušenja u tom slučaju nisu počinjale na apscisi već s maksimumom brzine. Međutim, uspoređivanjem maksimalnih brzina IR sušenja s brzinama FB sušenja koje odgovaraju vremenu sušenja  $t = 1$  min, može se izvesti zaključak da su maksimalne brzine FB sušenja bile 4-6 puta veće u odnosu na IR sušenje, a vrijeme sušenja potrebno za postizanje jednake vlažnosti materijala 2-3 puta kraće.

## 5.2. Rehidracija sušenog povrća

Nakon sušenja, provedena je rehidracija sušenog povrća potapanjem uzoraka u vodu sobne temperature uz periodično kontroliranje stupnja rehidracije s ciljem određivanja i modeliranja kinetike rehidracije te određivanja utjecaja temperature i načina sušenja na rehidracijska svojstva sušenog povrća.

Tijekom kvašenja povrća pri navedenim uvjetima količina absorbirane vode stalno se povećavala i to intenzivnije u početnom periodu (u prvih 30 minuta absorbirano je  $> 50\%$  ukupno absorbirane vode) nakon čega se daljnja rehidracija odvijala manjom brzinom. U svim provedenim pokusima tijekom 120 minuta rehidracije nije došlo do dostizanja ravnoteže (mase rehidratiranih uzoraka i dalje su se povećavale) te se stoga rehidracija nije mogla smatrati završenom. Baysal i suradnici [99] bilježe analogan tijek rehidracije uzoraka mrkve sušene IR, mikrovalnim i konvekcijskim zagrijavanjem te rehidratiranih kvašenjem u vodi temperature  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  tijekom 115 minuta, dok se u radu Seowa i suradnika [27] niti nakon 12 sati kvašenja sušenih uzoraka mrkve u vodi temperature  $28\text{ }^{\circ}\text{C}$  nije dostiglo ravnotežno stanje.

Sušeni uzorci krumpira za 2 sata rehidracije povećali su svoju masu za 2,43-3,57 puta (*Slike 4.26, 4.30*), a uzorci mrkve za 4,29-6,59 puta (*Slike 4.34, 4.38*) ovisno o temperaturi sušenja pri čemu su manje rehidracijske omjere i manju brzinu rehidracije imali uzorci povrća sušeni pri višim temperaturama sušenja. Jednaka ovisnost brzine rehidracije o temperaturi konvekcijskog sušenja uz fluidizaciju zabilježena je i tijekom rehidracije mrkve [16] i paprike [26], kao i rehidracije konvekcijski sušenih uzoraka krumpira i jabuke [142, 143]. Povećanje temperature sušenja (u ovom radu) imalo je analogan efekt na rehidraciju krumpira kao i povećanje snage mikrovalnog zagrijavanja što je prikazano u radu Wanga i suradnika [144]. Izražavanjem tijeka rehidracije kinetičkim krivuljama (ovisnost bezdimenzionalne vlažnosti o vremenu sušenja) potvrđuje se navedeno te se može vidjeti da su rehidratirani uzorci krumpira nakon dva sata

rehidracije sadržavali 36-71% (Slike 4.27, 4.31), a mrkve 57-93% (Slike 4.35, 4.39) vlažnosti svježeg uzorka (prije sušenja) ovisno o temperaturi pri kojoj su sušeni. Vjerojatan uzrok slabije rehidracijske sposobnosti sušenih uzoraka krumpira u odnosu na uzorke mrkve je različita priroda povrća (struktura i sastav) te su dehidracija i djelovanje topline imali različit utjecaj na krumpir i mrkvu. Rehidracija sušene hrane je općenito uvjetovana strukturom materijala i stupnjem „oštećenja“ sastojaka koji vezuju vodu što se poglavito odnosi na proteine i škrob [145]. Krumpir je povrće s visokim udjelom škroba (~ 20% ukupne mase [146]), dok je kod mrkve taj udio i više nego dvostruko niži (~ 9,1% [88]), što je mogući uzrok „lošije“ rehidracije uzorka krumpira jer je poznato da škrob sušenjem djelomično gubi sposobnost upijanja vode, što je izraženije pri temperaturama sušenja iznad 70 °C (početna temperatura želatinizacije ~ 67 °C [31, 146] kada nastaju ireverzibilne promjene strukture koje utječu na vezivanje i mobilnost molekula vode. Maté i suradnici [147] također su zaključuju da želatinizacija škroba ima značajniji utjecaj na rehidracijsku sposobnost svojstva krumpira nego poroznost i kompaktnost strukture s obzirom da su rehidracijska svojstva prethodno blanširanih i blanširanog uzorka bila slična. Osim želatinizacije, promjene škroba mogu se manifestirati i u obliku modifikacije škroba tijekom rehidracije [148].

### 5.2.1. Matematičko modeliranje kinetike rehidracije

Brzina rehidracije i doseg rehidracije određuju rehidracijsku sposobnost sušenog materijala te su stoga i indikator mogućih promjena primarnih kvalitativnih svojstava materijala (strukture, sastava, teksture). Proučavanje kinetike rehidracije omogućuje detektiranje utjecaja parametara sušenja na nastale promjene i određivanje najpovoljnijih uvjeta rehidracije. Matematičko modeliranje i u ovom slučaju može biti koristan alat u predviđanju tijeka procesa i određivanju parametara ključnih za prijenos mase.

Matematički modeli korišteni za modeliranje kinetike sušenja korišteni su i za opisivanje kinetike rehidracije ((3.16)-(3.32)), a njihova primjena i procjena njihove uspješnosti provedena je na isti način.

Ponovo su se Fickov i Lewisov model pokazali najmanje prikladnim za opisivanje kinetike cjelokupnog procesa na što su odmah uputile nešto niže vrijednosti korelacijskih koeficijenata (0,7337-0,9989) u odnosu na vrijednosti istog statističkog pokazatelja uspješnosti aproksimacije za ostale matematičke modela (0,9087-0,9997) (Tablice 4.13-16). Vrijednosti ukupnog kvadratnog odstupanja iznosile su 0,0540-0,0015 za Fickov i Lewisov model, a 0,0195-0,0001 za ostale modele. I drugi statistički parametri (niske MEB, RMSE, RMSE,  $\chi^2$ , E% vrijednosti te EF



vrijednost  $\sim 1$ ) ukazuju na dobro slaganje mjerenih i izračunati vrijednosti za predloženi modificirani Henderson-Pabis model, Pageov model, modificirani Page model i model Sander, kao i zadovoljavajuću prikladnost Pelegova modela (*Slike 4.28-29, 4.32-33, 4.36-37, 4.40-41*) za sve pokuse rehidracije bez obzira na uzorak povrća, temperaturu sušenja i način sušenja. Također i *slika 4.42* pokazuje dobro slaganje Pageova i modificiranog Henderson-Pabis modela s eksperimentalno dobivenim vrijednostima za kinetiku rehidracije.

Prikaz vrijednosti parametra svih modela procijenjenih za sve pokuse rehidracije dan je u *tablicama 4.13-16*, a njihove ovisnosti o temperaturama sušenja za različite načine sušenja prikazane su dijagramima na *slikama 4.43 i 4.45* (za parametre s dimenzijom vremena) te *slikama 4.44 i 4.46* (za parametre bez dimenzije). Ponovo se (kao i kod sušenja) može uočiti grupiranje parametara pojedinih modela, tj. parametri Pageova [47] i modificiranog Henderson-Pabisova modela ( $S'$ ) imali su sličnu ovisnost o temperaturi sušenja, a parametri ( $s$  dimenzijom vremena) ostalih modela imali su međusobno sličan tijek ovisnosti koji se razlikovao od prethodne grupe.

Fisherova analiza varijance (*Tablica 4.17*) pokazuje da je način sušenja imao utjecaj na sve „rehidracijske“ parametre modificiranog Henderson-Pabis modela te na  $n$  parametar Pageova i  $S$  parametar Henderson-Pabisova modela za obje vrste povrća, dok je utjecaj temperature sušenja na navedene parametre bio različiti s obzirom na vrstu povrća i način sušenja. Kod rehidracije uzoraka krumpira, temperatura sušenja imala je značajan utjecaj na parametre  $S$ ,  $S'$ ,  $n$  i  $N$ , a u slučaju rehidracije uzoraka mrkve potvrđen je taj utjecaj samo na parametre  $S$  i  $n$ . Za razliku od sušenja na Pageov parametar  $k$  i Henderson-Pabisov parametar  $G$  kod rehidracije nije zabilježen statistički opravdan utjecaj niti jednog ispitivanog faktora, iako su vrijednosti parametra  $k$  bile različite za različite temperature sušenja (*Slike 4.43, 4.45*), što bi (prema analizi varijance) mogla biti posljedica eksperimentalnih pogrešaka, dok su vrijednosti parametara  $n$  bile ovisne i o načinu i o temperaturi sušenja. Promjene vrijednosti parametara  $N$  i  $n$  upućuju na vjerojatnu ovisnost ovih parametara (osim o načinu sušenja) i o svojstvima materijala s obzirom da se prema *slikama 4.44 i 4.46* temperatura sušenja od 70 °C na neki način može smatrati „kritičnom temperaturom“ koja je tijekom dehidracije uzrokovala značajnije promjene fizikalno-kemijskih i strukturnih svojstava materijala (škroba) što je utjecalo i na rehidracijska svojstva (izraženije kod krumpira). Nije zabilježena razlika u kinetici rehidracije između (dva) različita uzorka svakog povrća niti za jedan rehidracijski pokus.

Funkcionalne ovisnosti parametara modela (*Tablica 4.18*) i njihovo uvođenje u Pageov i modificirani Henderson-Page model (*Tablica 4.19*) omogućili su simulaciju brzine rehidracije za uzorke povrća sušene pri različitim uvjetima. Simulacijske krivulje brzine rehidracije (*Slike*

4.47 i 4.48) prikazuju veliku početnu brzinu rehidracije nakon čega slijedi nagli pad te postepeno asimptotsko približavanje ravnotežnom stanju.

### 5.3. Koeficijent efektivne difuzije

Koeficijenti efektivne difuzije vlage kod sušenja (*Tablica 4.8*) i rehidracije (*Tablica 4.20*) krumpira i mrkve određene su prema procijenjenim parametrima modela (Fick, Lewis, Page, Henderson-Pabis i modificirani Henderson-Pabis), koji predstavljaju analitička rješenja II Fickova zakona difuzije. Obzirom na različite vrijednosti parametara modela i izraze za izračunavanje  $D_{ef}$ , za iste uvijete sušenja/rehidracije očekivano su dobivene različite vrijednosti koeficijenta efektivne difuzije. Analizom varijance utvrđeno je da nije bilo značajne razlike između efektivne difuzije vlage kod krumpira i kod mrkve, odnosno vrijednosti  $D_{ef}$  procijenjene za sve uvijete sušenja (rehidracije) prema svim matematičkim modelima nisu se međusobno statistički značajno razlikovale. Uspoređivanje svih vrijednosti  $D_{ef}$  dobivenih prema različitim modelima (bez obzira na povrće, način i temperaturu sušenja) (*Tablice 4.9 i 4.21*), pokazuje da pojednostavljeni Fickov, Lewisov i Pageov model daju vrijednosti koje se međusobno (statistički opravdano) ne razlikuju, a na isti način to je utvrđeno za Henderson-Pabis i modificirani Henderson-Pabis model. Navedeno proizlazi i iz činjenice da su vrijednosti dobivene iz posljednja dva modela bile veće u odnosu na vrijednosti izračunate prema ostalim modelima i to 0,3-25 puta kod sušenja, odnosno 0,3-30 puta kod rehidracije ovisno o vrsti povrća, načinu i temperaturi sušenja te uspoređivanim modelima. Međutim, vrijednosti  $D_{ef}$  prema Pageovom modelu imale su najslabiju korelaciju s ostalim vrijednostima, a u slučaju rehidracije ta je korelacija (jaka-vrlo jaka) bila čak i negativna ( $R = -(0,71-0,78)$ ) s obzirom da su vrijednosti  $D_{ef}$  bile veće kod povrća prethodno sušenog pri višim temperaturama sušenja, što je u suprotnosti s temperaturnim ovisnostima brzina rehidracije. Ostali modeli procijenili su koeficijente  $D_{ef}$  koji su (neovisno o njihovim vrijednostima) međusobno potpuno korelirali ( $R = 0,91-1,00$ ). Razlika u izračunatim vrijednostima svakako proizlaze iz činjenice da je za izračun  $D_{ef}$  iz Henderson-Pabisova i modificiranog Henderson-Pabis modela (za razliku od ostalih modela) korišteno više od jednog parametra modela (dva, odnosno tri), tj. koeficijent sušenja ( $S, S'$ ) te tzv. „lag faktor“ ( $G, (G' \cdot N)$ ), koji predstavlja specifični parametar prijenosa mase ovisan o načinu sušenja i debljini sloja [87] te prema Dinceru i Dostu direktno utječe i na vrijednost  $D_{ef}$ . Nepostojanje statistički značajne razlike između vrijednosti  $D_{ef}$  procijenjenih prema Henderson-Pabisovom modelu i predloženom Henderson-Pabis modelu može se reći da su

predloženi izrazi (*Tablica 3.2, Slika 4.22*) dali dobru analogiju s Dincer-Dostovim modelom određivanja  $D_{ef}$ .

Procijenjene vrijednosti koeficijenta efektivne difuzije vlage tijekom FB sušenja povrća kretale su se u rasponu vrijednosti:  $(1,36-2,75) \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$  prema konstantama Lewisova i Fickova modela,  $(2,60-4,61) \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$  prema Pageovom modelu, odnosno  $(10,48-17,91) \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$  prema Henderson-Pabisovom i modificiranom Henderson-Pabis modelu. Za IR sušenje vrijednosti  $D_{ef}$  procijenjene su u rasponu:  $(0,31-0,94) \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$  prema konstantama Lewisova i Fickova modela,  $(0,10-0,35) \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$  prema Pageovom modelu, odnosno  $(2,88-6,75) \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$  prema Henderson-Pabisovom i modificiranom Henderson-Pabis modelu. Ovisnost  $D_{ef}$  o načinu sušenja i temperaturi sušenja u trendu ovisnosti brzina sušenja o navedenim faktorima, a vrijednosti se mogu usporediti s rezultatima drugih istraživača dostupnih u literaturi (*Tablica 5.1*) ako se u obzir uzmu načini sušenja i procjenjivanja koeficijenta.

Međutim, bez obzira na način izračuna, oba faktora (i temperatura i način sušenja) utjecali su na efektivnu difuziju vlage tijekom sušenja uz postojanje njihovog međuovisnog djelovanja. Temperatura sušenja imala je pozitivan utjecaj na  $D_{ef}$  (pri višoj temperaturi  $D_{ef}$  je bio veći), dok su sve vrijednosti  $D_{ef}$  bile veće kod FB sušenja nego kod IR sušenja (bez obzira na temperaturu sušenja). Međuovisno djelovanje ova dva faktora sušenja potvrdili su i prikazi ovisnosti  $D_{ef}$  o temperaturi sušenja (prema Arrheniusu (*Slika 4.23*)) te određene vrijednosti energija aktivacije (*Tablica 4.10*) za efektivnu difuziju vlage tijekom sušenja.

Vrijednosti energije aktivacije ( $E_a$ ) difuzije vlage za uzorke povrća sušene konvekcijski uz fluidizaciju iznosile su  $(6,7 - 22,2) \text{ kJ/mol}$ , a za uzorke sušene infracrvenim zagrijavanjem  $(22,7 - 36,7) \text{ kJ/mol}$  ovisno o načinu procjene  $D_{ef}$ . Sve dobivene vrijednosti  $E_a$  potvrđuju da su oba svi pokusi sušenja bili ovisni o brzini difuzije ( $E_a < 34 \text{ kJ/mol}$ ) [80]. Molekule vode u mobilnom stanju troše mnogo manje energije prilikom migracije, stoga je manja  $E_a$  potrebna za proces posljedica povećane prosječne energije molekula koje sudjeluju u procesu (difuzije), pri čemu procesu s manjom  $E_a$  (FB sušenje) odgovara veća brzina sušenja [46]. Ujedno, veća  $E_a$  (IR sušenje) pokazatelj je izraženijeg utjecaja temperature na povećanje brzine difuzije [48], odnosno jednako povećanje temperature sušenja kod dva različita načina sušenja FB i IR sušenja rezultirati će značajnijim povećanjem brzine sušenja kod IR sušenja nego kod FB sušenja. Vrijednost  $E_a$  za difuziju vlage procijenjenu prema Pageovom modelu najviše se razlikovala u odnosu na vrijednosti određene prema ostalim modelima.

Energije aktivacije za efektivnu difuziju kod sušenja bile su veće za mrkvu, a kod rehidracije za krumpir, što prema prethodno navedenom odgovara većoj brzini sušenja i manjoj

brzini rehidracije krumpira u odnosu na mrkvu, a vrijednosti su u skladu s  $E_a$  dostupnim u literaturi (Tablica 5.2).

**Tablica 5.1** Vrijednosti koeficijenta efektivne difuzije vlage tijekom sušenja ( $D_{ef}$ ) mrkve i krumpira prema literaturnim izvorima

MRKVA			
Uvjeti sušenja	Način određivanja $D_{ef}$	$D_{ef} \cdot 10^9, m^2/s$	Literaturni izvor
IR sušenje: 50-80 °C (1,5 mm)	pojednostavljeni Fickov model (iz nagiba pravca)	0,073-0,15	[36]
(15-100) °C		0,3-2,4	[20]
konveksijsko: 40-70 °C, 3 m/s (cilindar: 70)	pojednostavljeni Fickov model (iz nagiba pravca)	0,7-1,2	[6]
konveksijsko: 50-70 °C, 0,5-1 m/s (10x10x10 mm; 20x20x20 mm)	pojednostavljeni Fickov model (iz nagiba pravca)	0,78-9,34	[39]
KRUMPIR			
Uvjeti sušenja	Način određivanja $D_{ef}$	$D_{ef} \cdot 10^9, m^2/s$	Literaturni izvor
konveksijsko: 1,5 m/s; 60-80 °C (8x18x8 mm; 12,5x25x12,5 mm)	pojednostavljeni Fickov model (iz nagiba pravca)	1,55-1,92; 2,29-3,28	[25]
mikrovalno-konveksijsko: 50-70 °C (1,3x1,3x1,3 cm)	pojednostavljeni Fickov model (iz nagiba pravca)	0,87-2,17	[146]
IR/konveksijsko: 0,125-0,500 W/cm <sup>2</sup> ; 0,5 m/s; 36% RH [40x40x(2,5; 6,5; 0,5) mm]	pojednostavljeni Fickov model (iz nagiba pravca)	0,059-1,73	[46]
(25-90) °C; (0,2- 4) kg <sub>v</sub> /kg <sub>st</sub>		0,02-3,8	[20]
prirodna konvekcija: 60 °C (50x10 mm)	bez skupljanja; sa skupljanjem uzorka	4,48; 2,22	[132]
konveksijsko: 40-70 °C, 3 m/s (cilindar: 70)	pojednostavljeni Fickov model (iz nagiba pravca)	0,5-1,02	[6]
konveksijsko: 1,5 m/s; 30-60 °C; konveksijsko-mikrovalno (13,5x3,5 mm)	Dincer-Dost model određivanja	1,3-1,9; 6,9-11,8	[5]
konveksijsko: 0,5-1 m/s, 40-85 °C (45x20x10 mm)	pojednostavljeni Fickov model uz promjenu debljine uzorka	0,43-1,9	[9]
konveksijsko: 70 °C, 1 m/s (5 mm)	iz konstante Lewisova modela	1,59	[149]

**Tablica 5.2** Vrijednosti energije aktivacije ( $E_a$ ) za efektivnu difuziju vlage tijekom sušenja mrkve i krumpira prema literaturnim izvorima

MRKVA			
Uvjeti sušenja	Način određivanja $D_{ef}$	$E_a, kJ/mol$	Literaturni izvor
IR sušenje: 50-80 °C (1,5 mm)	pojednostavljeni Fickov model (iz nagiba pravca)	22,43	[36]
konveksijsko: 40-70 °C, 3 m/s (cilindar: 70)	pojednostavljeni Fickov model (iz nagiba pravca)	16,53	[6]
konveksijsko: 50-70 °C, 0,5-1 m/s (10x10x10 mm; 20x20x20 mm)	pojednostavljeni Fickov model (iz nagiba pravca)	28,36	[39]
KRUMPIR			
Uvjeti sušenja	Način određivanja $D_{ef}$	$E_a, kJ/mol$	Literaturni izvor
mikrovalno-konveksijsko: 50-70 °C (1,3x1,3x1,3 cm)	pojednostavljeni Fickov model (iz nagiba pravca)	30,66	[146]
konveksijsko: 40-70 °C, 3 m/s (cilindar: 70)	pojednostavljeni Fickov model (iz nagiba pravca)	23,61	[6]

Za razliku od procesa sušenja, temperatura sušenja imala je uglavnom suprotan utjecaj na efektivnu difuziju kod rehidracije (*Tablica 4.20*). Što je temperatura sušenja povrća bila veća to je koeficijent efektivne difuzije za rehidraciju bio manji, osim u slučaju Pageova modela što je u skladu s utjecajem temperature sušenja na parametre modela te spomenutom korelacijom s ostalim modelima. Procijenjene vrijednosti koeficijenta efektivne difuzije vlage tijekom rehidracije povrća kretale su se u rasponu vrijednosti:  $(14,92-1,75) \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$  prema Henderson-Pabisovom i modificiranom Henderson-Pabis modelu, odnosno  $(0,9-0,11) \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$  prema konstantama Lewisova i Fickova modela što je u skladu s dostupnim literaturnim podacima (*Tablica 5.3*).

**Tablica 5.3** Vrijednosti koeficijenta efektivne difuzije vlage tijekom rehidracije ( $D_{\text{ef}}$ ) mrkve prema literaturnim izvorima

MRKVA			
Uvjeti sušenja	Način određivanja $D_{\text{ef}}$	$D_{\text{ef}} \cdot 10^9, \text{ m}^2/\text{s}$	Literaturni izvor
sušenje smrzavanjem (0,4 cm; blanširanje)	normalizirana Weibulova distribucija	1,2	[100]
konvekcijsko sušenje 70 °C (0,4 cm; blanširanje)	normalizirana Weibulova distribucija	0,05	[100]
konvekcijsko-prirodna konvekcija: 60 °C (3,5φx2,5 mm)	polednostavljeni Fick – nagib pravca	0,64	[49]

Najmanje vrijednosti  $E_a$  (*Tablica 4.22*) određene za efektivnu difuziju vlage tijekom rehidracije prema Arrheniusu (*Slika 4.49*) su procijenjenu prema Pageovom modelu ((1,7 - 12,0) kJ/mol), dok su najveće vrijednosti određene prema modificiranom Henderson-Pabis modelu za krumpir ((35,6 - 41,2) kJ/mol), odnosno prema Fickovom modelu za mrkvu ((20,8 - 28,8) kJ/mol).

Energije aktivacije za efektivnu difuziju kod sušenja bile su veće za mrkvu, a kod rehidracije za krumpir, što prema prethodno navedenom odgovara većoj brzini sušenja i manjoj brzini rehidracije krumpira u odnosu na mrkvu.

#### 5.4. Biotov broj i koeficijent prijenosa mase

Vrijednosti Biotova broja ( $Bi_m$ ) i koeficijenta prijenosa mase ( $k_m$ ) procijenjene su prema prijedlogu Dincera i Dosta iz parametara Henderson-Pabisova modela te analogno tome iz parametara novopredloženog modificiranog Henderson-Pabis modela za procese sušenja i rehidracije (*Tablice 4.11, 4.23*).

$Bi$ -broj jedan je od najvažnijih bezdimenzijskih parametara sušenja jer je pokazatelj odnosa vanjskih i unutarnjih otpora prijenosu mase (vlage), a ovisan je o svojstvima materijala i medija kojim se vrši sušenje. Veće vrijednosti  $Bi_m$  broja upućuju na povećanje unutarnjih, a slabljenje vanjskih otpora prijenosu tvari, odnosno za ( $Bi \leq 0,1$ ) ograničavajući faktori za prijenos mase su vanjski otpori, za ( $0,1 \leq Bi \leq 100$ ) i vanjski i unutarnji otpori važni su za prijenos tvari, a za ( $Bi \geq 100$ ) samo unutarnji otpori kontroliraju prijenos mase [82, 150]. Koeficijent prijenosa mase karakterizira brzinu prijenosa mase s površine materijala u okolni medij kroz granični sloj iznad materijala te on prvenstveno ovisi o svojstvima medija kojim se sušenje provodi i geometriji sustava u kojem se vrši prijenos mase (vanjski faktori) [151, 152]. Stoga bi za slučaj kada je ( $Bi \leq 0,1$ ) koeficijent prijenosa trebao biti manji nego u slučaju sušenja istog materijala u sustavu za koji je ( $Bi \geq 0,1$ ), kada i unutarnji otpori sudjeluju u kontroli prijenosa tvari.

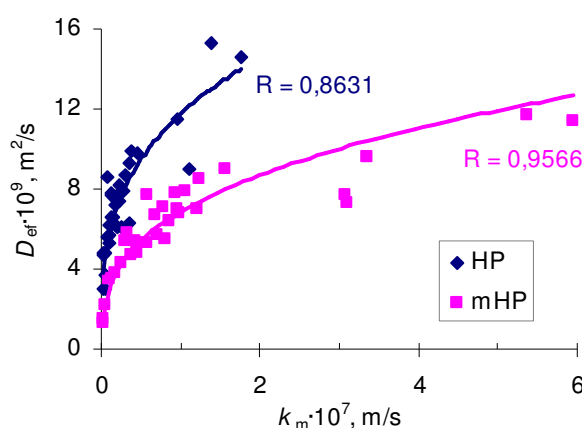
Vrijednosti  $Bi_m$  broja izračunate prema Henderson-Pabisovom i modificiranom Henderson-Pabisovom modelu za proces sušenja povrća međusobno se nisu značajno razlikovale ( $p = 0,7979 > 0,05$ ), a kretale su se u rasponu vrijednosti 0,42-0,66, što govori u prilog zajedničkog utjecaja i vanjskih i unutarnjih faktora na prijenos mase ( $Bi > 0,1$ ). S povišenjem temperature sušenja te vrijednosti su se povećavale iako statistički promatrano taj utjecaj nije bio značajan (Tablica 4.12). Za IR sušenje vrijednosti  $Bi_m$  su bile nešto manje nego za FB sušenje pri jednakim temperaturama sušenja, ali je statistički opravdan utjecaj načina sušenja zabilježen samo kod sušenja krumpira. S druge strane, vrijednosti koeficijenta prijenosa mase za IR sušenje ovisile su o matematičkom modelu iz čijih parametara su izračunate, što potvrđuje i analiza varijance ( $p = 0,0013 < 0,05$ ), dok za FB sušenje procijenjene vrijednosti za  $k_m$  nisu bile ovisne o matematičkom modelu ( $p = 0,06402 > 0,05$ ). Ipak, bez obzira na matematički model, koeficijent prijenosa mase bio je ovisan i o temperaturi sušenja (povećavao se s povišenjem temperature sušenja) i o načinu sušenja kod sušenja obje vrste povrća uz zabilježeno međuovisno djelovanje temperature i načina sušenja. Veće vrijednosti  $k_m$  ostvarene kod FB sušenja ( $(21,08-47,56) \cdot 10^{-7}$  m/s) posljedica su olakšane izmjene tvari (vlage) između površine materijala i okolnog medija zbog strujanja zraka, dok se kod IR sušenja taj prijenos vlage odvijao između površine materijala i mirujućeg (okolnog) medija pri čemu je otpor prijenosu tvari u graničnom sloju bio veći, a  $k_m$  manji ( $(2,47-13,98) \cdot 10^{-7}$  m/s). Dobivene vrijednosti slažu se s rezultatima rada McMinna i suradnika [5], koji su također koristili Dincer-Dostov analitički model procjene karakteristika prijenosa mase tijekom konveksijskog, mirkovalnog i kombiniranog načina

sušenja krumpira u obliku ploče te su dobili slične vrijednosti za  $Bi$  (0,079-11,441),  $D_{ef}$   $((1,4-37,3) \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s})$  i  $k_m$   $((6-301) \cdot 10^{-7} \text{ m/s})$ .

Rahman i Kumar [132] su proveli sušenje krumpira (različite debljine i geometrije) uz prijenos topline prirodnom konvekcijom pri 60 °C te su usporedili vrijednosti  $D_{ef}$ ,  $k_m$  i  $Bi_m$  koje su procijenili uzimajući u obzir skupljanje uzorka i zanemarujući ga pri čemu su vrijednosti  $D_{ef}$  za konstantnu debljinu uzorka bile očekivano veće (~ 2 puta) za iste brzine sušenja. Vrijednosti  $k_m$  su iznosile  $(2,98-5,20) \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$  u slučaju kada skupljanje uzorka nije uzeto u obzir, odnosno  $(2,23-3,51) \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$  kada se u obzir uzimala procijenjena promjena debljine uzorka. Vrijednosti  $Bi_m$ -broja rastle su tijekom sušenja rasponu od 0,05 do 1,00, što autori tumače kao nezanemariv utjecaj vanjskih faktora u kontroli brzine sušenja, a porast vrijednosti  $Bi_m$  s vremenom sušenja kao povećanje unutrašnjih otpora prijenosu mase s vremenom sušenja.

U slučaju rehidracije, sve izračunate vrijednosti  $Bi$ -broja bile su niže od 0,1 (*Tablica 4.23*), a razlikovale su se s obzirom na povrće ( $p = 0,0096 < 0,05$  uz veće vrijednosti za mrkvu) i matematički model ( $p = 0,0014 < 0,05$ ; veće vrijednosti za modificirani Henderson-Pabis model) prema kojem su izračunate. Na isti način su i izračunate vrijednosti  $k_m$  bile ovisne o vrsti povrća ( $p = 0,0103 < 0,05$ ) i o matematičkom modelu ( $p = 0,0279 < 0,05$ ) uz vrijednosti u rasponu  $(0,03-2,66) \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$ . Značajnost utjecaja temperature sušenja i načina sušenja također je ovisila o vrsti povrća i o načinu određivanja parametara prijenosa mase (*Tablica 4.24*) pri čemu se vrijednosti  $Bi$ -broja izračunatih prema Henderson-Pabisovom modelu nisu značajno mijenjale s promjenom uvjeta sušenja, dok su njegove vrijednosti prema modificiranom Henderson-Pabis modelu bile ovisne o načinu sušenja te kod krumpira i o temperaturi sušenja, što se odrazilo i na vrijednosti koeficijenta  $k_m$ . Dobivene vrijednosti  $Bi$ -broja prema Henderson-Pabisovom modelu i njihove „neovisnosti“ o uvjetima sušenja, upućuju na značajniji utjecaj vanjskih faktora na prijenos tvari nego što je to bio slučaj kod sušenja, odnosno označavaju ih kao faktore koji kontroliraju brzinu rehidracije uz zanemarujući utjecaj unutrašnjih faktora (svojstava materijala). U tom slučaju, bez promjene vanjskih faktora (uvjeta rehidracije), što je u ovom radu i ostvareno, ne bi trebalo doći niti do značajnije promjene efektivne difuzije, tj. brzine i dosega rehidracije bez obzira na različite uzorke (sušene pri različitim uvjetima), što kinetika rehidracije nije potvrđivala. Iako su i  $Bi$ -brojevi izračunati prema Henderson-Pabisovom modelu bili (uglavnom) manji od 0,1, promjene njihovih vrijednosti s načinom sušenja i s temperaturom sušenja (kod krumpira) idu u prilog smanjenja utjecaja vanjskih faktora i povećanju značaja utjecaja unutrašnjih faktora, odnosno svojstava materijala koja su bila ovisna o uvjetima sušenja, što je više u skladu s ostvarenim rehidracijskim svojstvima sušenog povrća. S druge strane, mali  $Bi$  brojevi upućuju na vrlo male razlike između sadržaja vlage i temperature

na površini i u sredini materijala, odnosno jednoliku raspodjelu temperature i vlage kroz materijal [153] što može biti prihvatljivo s obzirom na debljinu materijala i uvjete rehidracije. Međutim, i dalje su dobivene vrijednosti Biotova broja preniske jer je vjerojatnije da su pri postavljenim rehidrationskim uvjetima važan utjecaj imali i vanjski faktori uz prevladavanje unutarnjih otpora tim više što odnos procijenjenih koeficijenata  $D_{ef}$  i  $k_m$  nije linearan (Slika 5.1), odnosno povećanje koeficijenta prijenosa mase ne prati proporcionalno povećanje koeficijenta efektivne difuzije, što bi bilo ostvareno u slučaju stvarnog ograničavajućeg djelovanja vanjskih faktor. Velika brzina upijanja vode (kapilarno upijanje) u samom početku procesa rehidracije vjerojatna je posljedica relativno velike poroznosti materijala nastale sušenjem [100] i u tom periodu unutrašnji otpori prijenosu mase su gotovo zanemarivi, ali nadalje je brzina rehidracije u stalnom opadanju i ovisna o svojstvima materijala, koji su u ovom slučaju bili posljedica uvjeta sušenja i prirode povrća.



**Slika 5.1** Međuodnos koeficijenta efektivne difuzije vlage ( $D_{ef}$ ) i koeficijenta prijenosa mase ( $k_m$ ) kod rehidracije određenih prema Henderson-Pabisovom [HP] i modificiranom Henderson-Pabis modelu [mHP] za sve uzorke povrća (sušenog pri svim uvjetima sušenja)

Prevladavanje unutrašnjih faktora u kontroli brzine rehidracije bilježe i drugi autori. Marabi i suradnici [100] su potvrdili da tijekom rehidracije sušenih uzoraka mrkve brzina miješanja rehidrationskog medija (deionizirana voda) nije imala utjecaj na promjenu brzine difuzije (bez obzira na način sušenja povrća) što dokazuje da je upijanja vode fenomen kontroliran unutrašnjim faktorima.

Rovedo i suradnici [33] su koristili različite izraze za predviđanje  $Bi_m$ , koji podrazumijevaju ovisnost  $Bi$  broj o (različitim) parcijalnim pokretačkim silama pri čemu su dobili različite  $Bi$  vrijednosti i njegove promjene tijekom sušenja krumpira. Zaključili su da  $Bi$  ne daje uvijek mogućnost određivanja limitirajućeg otpora te da je samo ukupna (sumarna) pokretačka sila, i



njene promjene, ključni faktor za proces sušenja te da se njezinim raščlanjivanjem na parcijalne pokretačke sile u čvrstoj i plinskoj fazi (preko  $Bi$  broja) ne dobiva potpuna „slika“ procesa.

Pelegov model se u ovom radu pokazao relativno uspješnim u aproksimiranju eksperimentalnih podataka sušenja i rehidracije, stoga su vrijednosti Pelegove konstante brzine sušenja i rehidracije ( $K_1$ ) stavljen u odnos s procijenjenim vrijednostima za  $D_{ef}$  (Slike 4.24, 4.50). Za proces sušenja dobivene su eksponencijalne ovisnosti  $D_{ef}$  o  $K_1$  bez obzira na model prema kojemu su procijenjene vrijednosti koeficijenta efektivne difuzije uz visoke koeficijente korelacije ( $> 0,99$ ), dok su kod procesa rehidracije ove ovisnosti bili manje izraženi sa vrlo slabom korelacijom za Pageov model, odnosno jakim korelacijama ( $> 0,60$ ) za ostale modele. Korelacije između inicijalne brzine sušenja prema Pelegovom modelu (2.19) i maksimalnih brzina sušenja određenih prema Pageovom i modificiranom Henderso-Pabis modelu bile su vrlo visoke korelaciju ( $> 0,98$ ) (Slika 4.25).

## 5.5. Kritično vrijeme

Svi matematički modeli (3.9-15) odabrani za modeliranje kinetike sušenja nastali kao analitičko rješenje Fickova zakona difuzije, jednočlani su i u sebi sadrže od jednog do tri parametra, čije su vrijednosti procijenjene prema eksperimentalnim podacima. Obzirom na vrijednosti parametra svakog pojedinog modela, koji u sebi sadrže dimenziju vremena (funkcija njene recipročne vrijednost), njihovog međusobnog odnosa i njihove ovisnosti o temperaturi sušenja pretpostavljeno je da postoji i parametar koji ih međusobno povezuje, a koji, moguće je objedinjuje i ostale procijenjene parametre ukoliko ih pojedini model sadrži.

Sander i suradnici [141, 154] predložili su modifikaciju Pageova modela uvođenjem (novopredloženog) parametra  $t_k$  komu su dali i fizikalno značenje, odnosno dokazali su da je kombiniranjem parametara Pageova modela  $k$  i  $n$  moguće izračunati vrijeme ( $t_k$ ) u kojemu dolazi po promjene mehanizma prijenosa vlage kroz materijal tijekom sušenja različitih anorganskih materijala, kože i drva. Kako mehanizam prijenosa tvari u periodu padajuće brzine sušenja, između ostalog, ovisi i o raspodjeli veličina pora materijala, zaključeno je da, kod materijala s vrlo finim porama ( $d < 10^{-7}$  m), gdje se vlaga prenosi difuzijom, vrijeme  $t_k$  odgovara vremenu početka padajuće brzine sušenja (kritična točka sušenja), a kod materijala koji imaju i veće pore,  $t_k$  odgovara vremenu kada dolazi do promjene mehanizma prijenosa vlage iz kapilarnog u difuzijski tok (druga kritična točka sušenja).

Prema tome, izraz za izračunavanje tzv. *kritičnog vremena* ( $t_k$ ) pomoću parametara Pageova modela (3.11) može se pisati kao:

$$t_k = \sqrt[n]{\frac{1}{k}} \quad (5.1)$$

Slijedom navedenog, pretpostavljeno je da će i parametri ostalih, u ovom radu korištenih matematičkih modela sušenja, dati mogućnost izračuna nekog karakterističnog (kritičnog) vremena. Kombinacijom procijenjenih parametara za svaki model sušenja dobiveni su dolje navedeni izrazi (5.2-6), koji su za određenu temperaturu sušenja, način dovođenja topline materijalu (konvekcijski - konvekcijsko sušenja u fluidiziranom sloju ili radijacijom -infracrveno sušenje) i materijal koji se sušio (krumpir ili mrkva), uvijek dali vrijeme jednako *kritičnom vremenu* izračunatom prema izrazu (5.1).

Predloženi izrazi su slijedeći:

za Fickov /pojednostavljeni/ model (3.9):

$$t_k = \frac{(8/\pi^2)}{K_F} \quad (5.2)$$

za Lewisov model (3.10):

$$t_k = \frac{1}{K_L} \quad (5.3)$$

za modificirani Pageov model (3.12):

$$t_k = \frac{1}{k'} \quad (5.4)$$

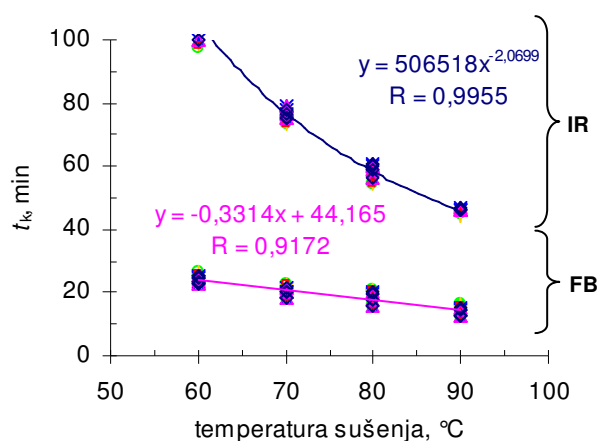
za Henderson-Pabisov model (3.14):

$$t_k = \frac{1}{S} \cdot G = \frac{G}{S} \quad (5.5)$$

te za predloženu modifikaciju Henderson-Pabisova modela (3.15) kao:

$$t_k = \sqrt[N]{\frac{1}{S'}} \cdot G' = \frac{G'}{\sqrt[N]{S'}} \quad (5.6)$$

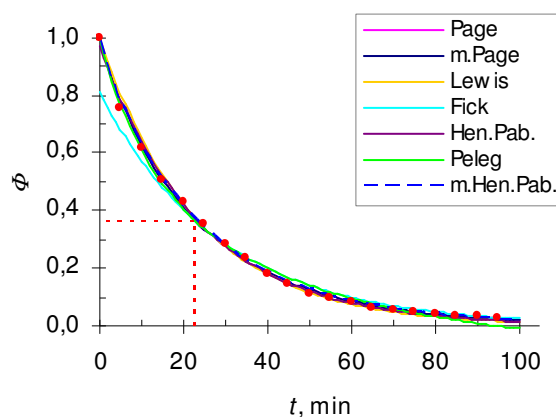
Karakteristične vrijednosti za  $t_k$  izračunate iz procijenjenih parametara prema navedenim izrazima ovisile su o temperaturi sušenja i načinu sušenja, dok je utjecaj samog materijala (krumpir ili mrkva) bio zanemariv bez obzira koji matematički model je upotrijebljen za izračun te bez obzira kakva je statistička uspješnost modela u aproksimiranju eksperimentalnih podataka, što se može vidjeti i na slijedećem grafičkom prikazu (*Slika 5.2*).



**Slika 5.2** Vrijednosti kritičnog vremena ( $t_k$ ), izračunatog pomoću procijenjenih parametara različitih modela sušenja, u ovisnosti o temperaturi sušenja. Prikazane su sve vrijednosti  $t_k$  dobivene za sve uzorke krumpira i mrkve (uzorci: K.I., K.II, M.I, M.II), koji su sušeni konvekcijski u fluidiziranom sloju [FB], odnosno radijacijskim [IR] načinom sušenja

Iz *Slike 5.2* je vidljivo da vrijeme  $t_k$  ovisi o načinu sušenja i o temperaturi sušenja. Vrijeme  $t_k$  se skraćuje s povećanjem temperature sušenja kod oba načina sušenja, te da se to kritično vrijeme kod radijacijskog sušenja postiže znatno kasnije ((109-46) min) nego li je to slučaj tijekom konvekcijskog sušenja u fluidiziranom sloju ((25-13) min) za istu temperaturu sušenja. Također, može se uočiti jasna eksponencijalna ovisnost  $t_k$  o temperaturi sušenja kod infracrvenog sušenja, dok je ta ovisnost linearna kod konvekcijskog sušenja povrća u fluidiziranom sloju. Prema tome, jednako povećanje temperature sušenja ima značajniji utjecaj na skraćivanje vremena dostizanja  $t_k$  kod infracrvenog sušenja nego kod konvekcijskog sušenja.

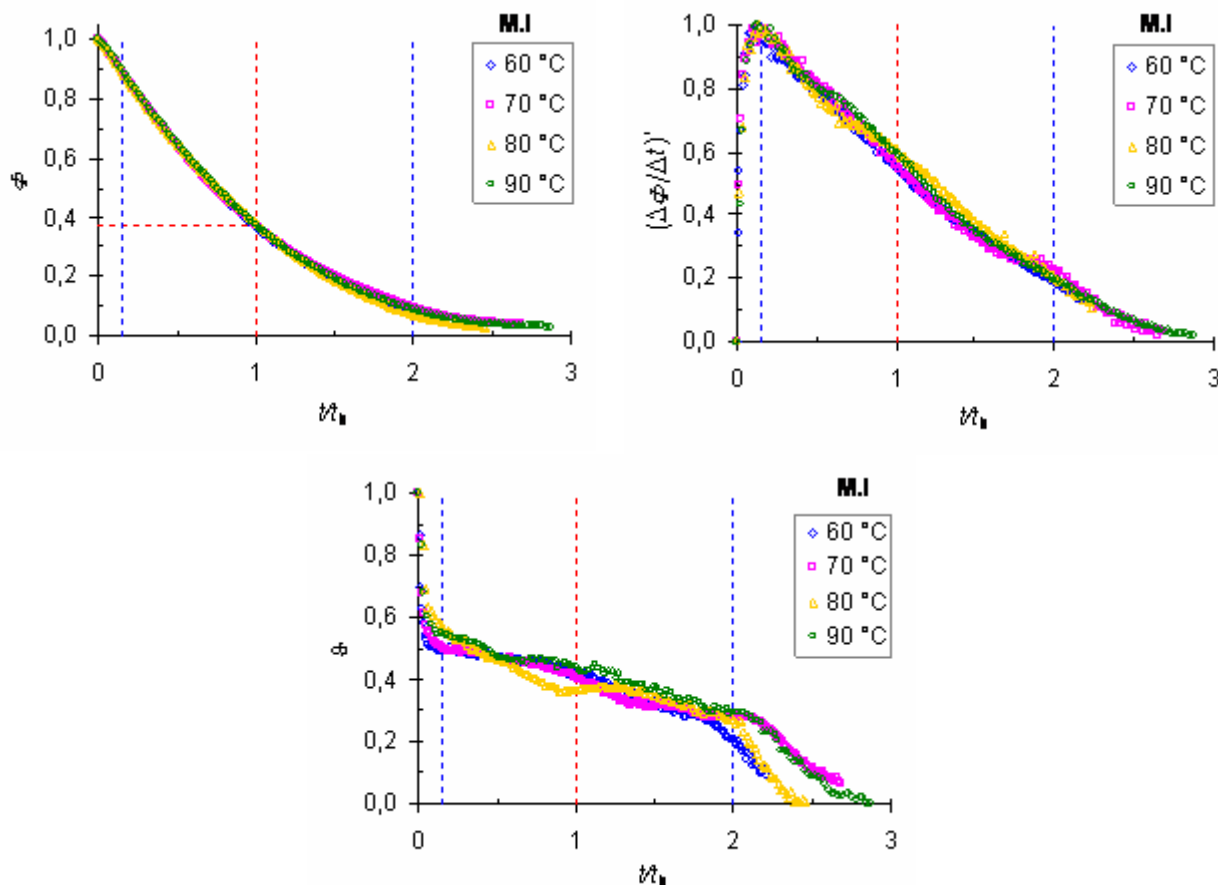
Uvrštavanjem  $t_k$  u svaki primijenjeni matematički model dobivena je uvijek ista vrijednost bezdimenzionalne vlažnosti materijala ( $\Phi$ ), odnosno krivlje sušenja prema različitim matematičkim modelima uvijek su se sjekle u istoj točki, kao što se to vidi na slijedećem primjeru konvekcijskog sušenja mrkve u fluidiziranom sloju pri 60 °C (*Slika 5.3*).



**Slika 5.3** FB sušenje mrkve (M.I) pri 60 °C (simbolima su prikazani eksperimentalni podaci, a linijama krivulje sušenja određene prema navedenim modelima)

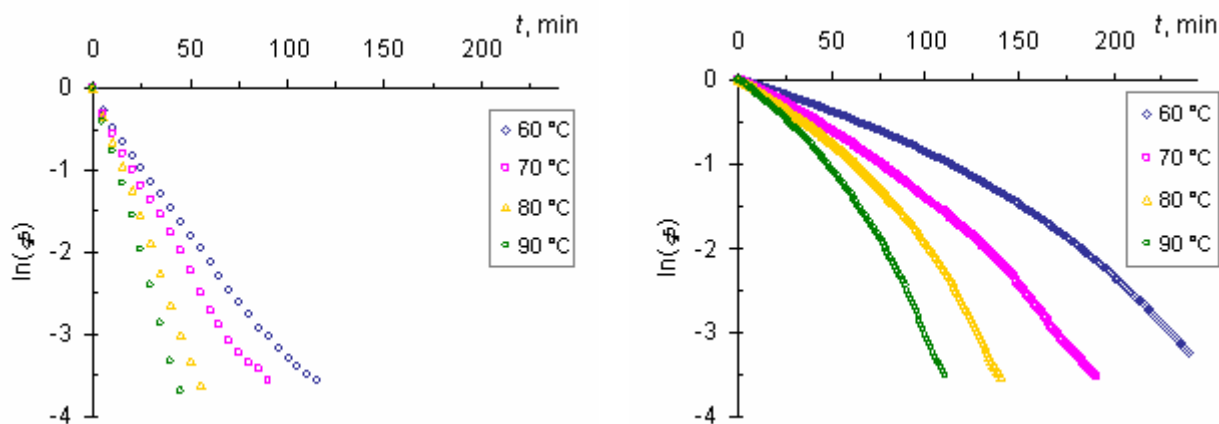
Uspoređivanjem načina sušenja i temperatura sušenja za obje vrste povrća (i krumpir i mrkvu), uočeno je da je vrijednost bezdimenzionalne vlažnosti, koja odgovara *kritičnom vremenu sušenja* ( $t_k$ ), uvijek iznosila **0,368**, što se za primijenjene eksperimentalne uvijete može smatrati *kritičnom bezdimenzionalnom vlažnosti* ( $\Phi_k$ ) uzoraka krumpira i mrkve veličine (15x15x5) mm.

Ukoliko se krivulje sušenja za određeni materijal i način sušenja prikažu na način da se bezdimenzionalna vlažnost ( $\Phi$ ), omjer trenutne i maksimalne brzine - bezdimenzionalna brzina sušenja ( $(\Delta\Phi/\Delta t)' = (\Delta\Phi/\Delta t)/(\Delta\Phi/\Delta t)_{\max}$ ), odnosno bezdimenzionalna temperatura uzorka ( $\vartheta' = (\vartheta - \vartheta_s)/(\vartheta_0 - \vartheta_s)$ ) stave u ovisnosti o bezdimenzionalnom vremenu sušenja ( $t' = t/t_k$ ), dobivaju se za pojedini materijal *karakteristične krivulje sušenja* analogno CDC-krivuljama [19, 141, 154, 155]. Točnije, krivulje za različite temperature sušenja međusobno se poklapaju kao što se to može vidjeti na primjeru (*Slika 5.4*) infracrvenog sušenju mrkve (uzorak M.I.), gdje je vidljivo da vremenu  $t' = 1$  odgovara bezdimenzionalna vlažnost od 0,368. Također se mogu uočiti više različitih perioda padajuće brzine sušenja. Nakon kratkog početnog perioda zagrijavanja materijala, slijede dva različita perioda padajuće brzine sušenja, od kojih se prvi odvija do vremena  $t_k$ , a drugi između vremena  $t_k$  i  $\sim 2 \cdot t_k$  (za IR sušenje), nakon čega slijedi i zadnji period sušenja ( $\Phi < 0,1$ ) u kojem dolazi do naglog pada brzine sušenja i naglog porasta temperature uzorka, odnosno smanjivanja temperature  $\vartheta$ . Dva perioda padajuće brzine sušenja uz potpuni izostanak konstantne brzine sušenja zabilježen je i kod mikrovalnog sušenja krumpira (različite debljine) uz primjenu različitih snaga mikrovalnog zračenja [144].



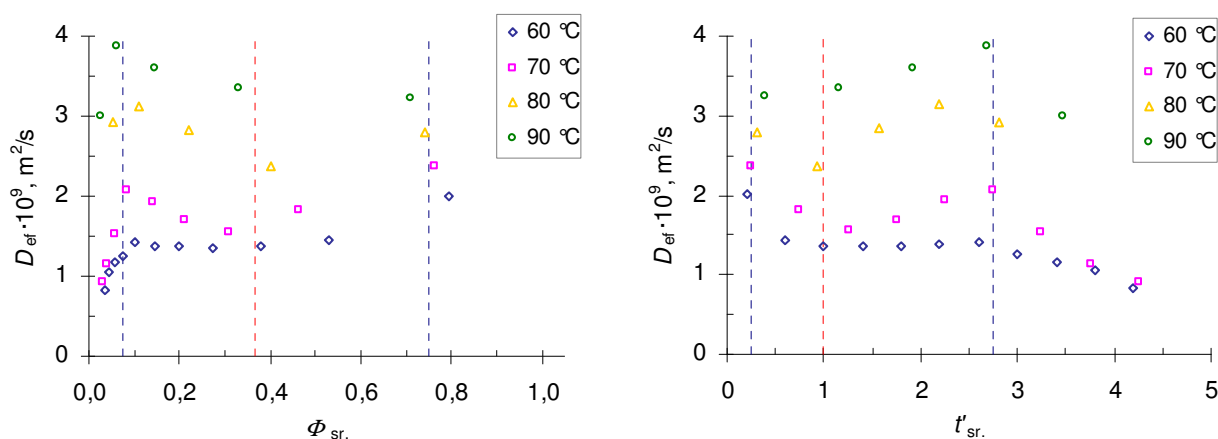
**Slika 5.4** Primjer karakterističnih krivulja sušenja – eksperimentalne (bezdimenzionalne) krivulje infracrvenog sušenja krumpira (uzorak K.I.)

Obzirom da postojanje dva „glavna“ perioda padajuće brzine za pretpostaviti je da su i faktori ključni za mehanizam difuzije za ova dva perioda različiti, tj. da su koeficijenti efektivne difuzije u tim periodima različitih vrijednosti. Pretpostavka je potvrđena prikazivanjem krivulja sušenja u polulogaritmским prikazima, odnosno ovisnost  $\ln(\Phi)$  o  $t$  (Slika 5.5) nije dala u potpunosti linearne prikaze niti za jedan pokus sušenja.



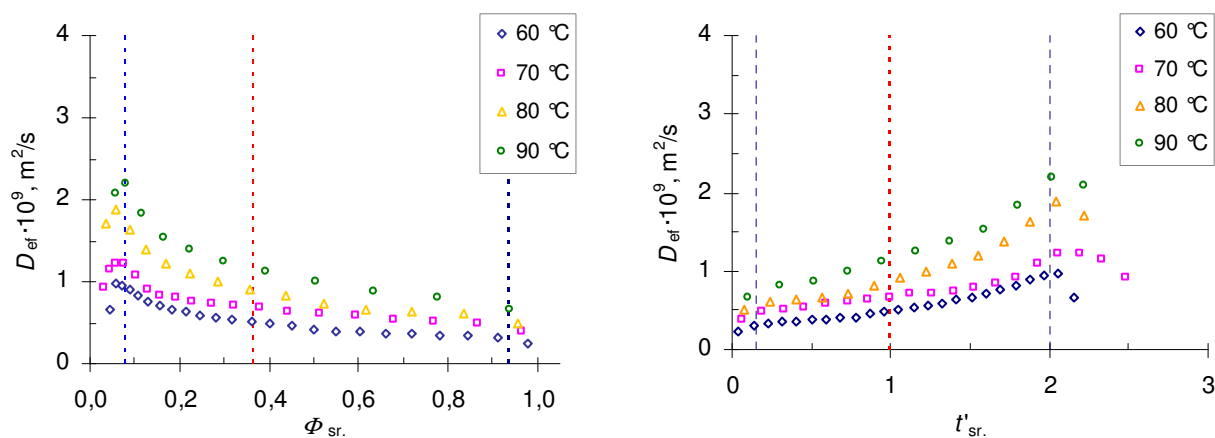
**Slika 5.5** Primjer polulogaritmskog oblika eksperimentalnih krivulja sušenja za FB i IR sušenje mrkve (M.II) pri različitim temperaturama sušenja

Dijeljenjem eksperimentalnih podataka na kratke vremenske periode (15 min za FB sušenje, 10 min za IR sušenje) i izračunavanjem koeficijenta efektivne difuzije iz nagiba pravca prema Lewisovom modelu, dobivene su ovisnosti koje potvrđuju da se vrijednost efektivne difuzije vode/vlage mijenjaju kako se izmjenjuju različiti periodi sušenja, uz jasne razlike između dva primijenjena načina sušenja, što se može vidjeti na primjeru sušenja mrkve (Slike 5.6, 5.7).



**Slika 5.6** Ovisnost vrijednosti efektivnog koeficijenta difuzivnosti ( $D_{ef}$ ) o srednjoj bezdimenzijskoj vlažnosti ( $\Phi_{sr}$ ) i bezdimenzijskom srednjem vremenu ( $t'_{sr}$ ) za uzorke mrkve sušene konvekcijski uz fluidizaciju prema eksperimentalnim podacima materijala

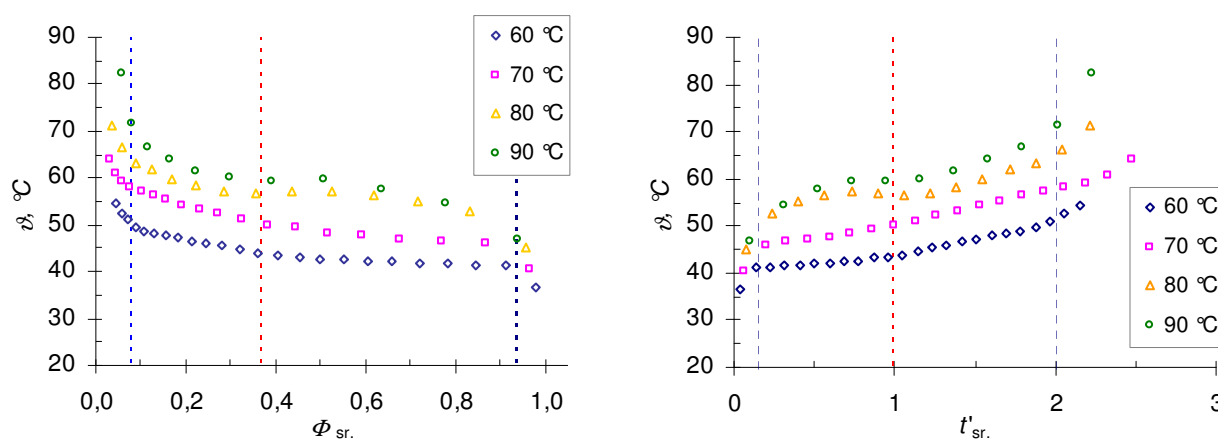
Slike 5.6 i 5.7 također potvrđuju značajan utjecaj temperature i načina sušenja na vrijednost  $D_{ef}$ . Kod oba načina sušenja mogu se uočiti četiri različita perioda (na slikama omeđena okomitim isprekidanim linijama), tj. početni period, nakon čega slijede dva perioda međusobno odijeljena crvenom isprekidanom linijom (koja odgovara bezdimenzionalnoj vlažnosti uzorka od 0,368, odnosno bezdimenzionalnom „kritičnom“ vremenu 1), nakon čega slijedi zadnji period kada kod oba načina sušenja dolazi do pada vrijednosti  $D_{ef}$ .



**Slika 5.7** Ovisnost vrijednosti efektivnog koeficijenta difuzivnosti ( $D_{ef}$ ) o srednjoj bezdimenzijskoj vlažnosti ( $\Phi_{sr}$ ) i bezdimenzijskom srednjem vremenu ( $t'_{sr}$ ) za uzorke mrkve sušene infracrvenim sušenjem prema eksperimentalnim podacima materijala

U drugom periodu (prije kritičnog vremena), kod FB sušenja (*Slika 5.6*) vrijednosti  $D_{ef}$  opada sa smanjenjem vlažnosti materijala, odnosno s povećanjem vremena sušenja, dok je kod IR sušenja (*Slika 5.7*) u ovom periodu zabilježen „blagi“ porast vrijednosti  $D_{ef}$ . U periodu poslije kritičnog vremena u oba slučaja došlo je do „značajnijeg“ porasta vrijednosti  $D_{ef}$  sa smanjenjem vlažnosti materijala, odnosno s povećanjem vremena sušenja, do postizanja maksimalne vrijednosti. Dobiveni rezultati za IR sušenje slažu se s rezultatima Achariyaviriya i suradnika [23], koji su u svom radu razvili četiri različita modela određivanja/izračunavanja efektivnog difuzijskog koeficijenta konvekcijskog sušenja manga i papaje. Njihovi predloženi modeli predstavljaju različite analitičke oblike rješavanja II Fickova zakona difuzije uz pretpostavku da je efektivni difuzijski koeficijent konstantan odnosno da je linearno ovisan o vlažnosti materijala, a najbolja slaganja s eksperimentalnim podacima dao je model koji pretpostavlja da je  $D_{ef}$  konstantan u kratkim vremenskim periodima pri čemu njegova vrijednost raste sa smanjenjem vlažnosti materijala do postizanja maksimuma, a potom se smanjuje kako se sušenje bliži samom kraju. Pretpostavljeno je da su na različito kretanje vrijednosti efektivnog difuzijskog koeficijenta (u prvom dijelu padajuće brzine sušenja) kod FB i IR sušenja mogli utjecati vanjski faktori, tj. različiti mehanizmi prijenos topline i tvari između materijala i medija, što bi se moglo vidjeti preko trenda promjene temperature materijala. Kod IR sušenja intenzitet isijavanja je bio konstantan i odgovarajući zadanoj temperaturi sušenja te se toplina direktno prenosili do materijala pri čemu se temperatura uzorka (*Slika 5.8*) u prva tri perioda mijenjala analogno promjeni vrijednosti  $D_{ef}$  (*Slika 5.7*), a nakon uklanjanja ~90% početne vlažnosti dolazi do naglog porasta temperature materijala i naglog pada vrijednosti  $D_{ef}$ . Rovedo i suradnici [33] tu točku smatraju „prijelomnom točkom“ („*breakpoint*“) kada dolazi do naglog pada ukupne pokretačke sile procesa sušenja što uzrokuje nagli pad brzine sušenja te dolazi do naglog povećanja temperature sušenja. Thorvaldsson i Janestad [156] su tijekom sušenja pomoću optičkih vlakana i termoparova mjerili vlažnost i temperaturu krušnih mrkvice na površini, polovini udaljenosti od sredine i u sredini uzorka. Trend promjene temperature bio je analogan rezultatima dobivenim u ovom radu uz međusobno male razlikama s obzirom na mjesto postavljanja termopara. S druge strane mjerenje vlažnosti je pokazalo da se sadržaj vlage na površini naglo smanjivao od samog početka sušenja, na polovini udaljenosti do sredine zabilježen je početni blagi porast vlažnosti a potom pad do kraja sušenja, dok se vlažnost u samoj sredini uzorka polagano povećavala uz gotovo konstantnu temperaturu uzorka. Kada se konačno vlažnost u centru počela smanjivati i temperatura materijala je naglo porasla. Autori su na taj način opisali mehanizam difuzije (pare i tekućine) te ga objasnili preko modela isparavanje-kondenzacija. Stvaranje gradijenta parcijalnog tlaka vodene pare (zbog naglog sušenja površine materijala) uvjetuje difuziju vodene

pare prema sredini materijala gdje ona kondenzira zbog niže temperature te s vremenom stvara gradijent koncentracije tekućine što uzrokuje njenu migraciju prema površini.



**Slika 5.8** Trend promjene temperature uzoraka mrkve tijekom infracrvenog sušenja u ovisnosti o vlažnosti materijala ( $\Phi_{sr}$ ) i bedimenzionalnom vremenu sušenja ( $t'_{sr}$ )

U prethodnim razmatranjima pretpostavka je bila da nema promjene debljine uzorka, dok su Ruiz-Cabrera i suradnici [157] pronašli eksponencijalnu ovisnost promjene debljine uzorka mrkve o vremenu sušenja, te sugeriraju da jednostavni difuzijski modeli uz zanemarivanje skupljanja materijala daju dobro slaganje s eksperimentalnim podacima, ali da u tom slučaju procijenjeni koeficijent efektivne difuzije nije pokazatelj samo prijenosnih svojstava već je odraz i procesa skupljanja materijala. Dok Viollaz (1987) [33] istodobnu jednosmjernu difuziju vlage i promjenu volumena (trodimenzionalno skupljanje uzorka) smatra uzrokom postojanja drugog perioda padajuće brzine sušenja.

Kod provedbe eksperimenta sušenja uzoraka povrća konvekcijskim načinom u fluidizirnom sloju, sušenje se provodilo sa zrakom koji je ulazio u kolonu za sušenja (također) s konstantnom, zadanom temperaturom, ali tijekom provedbe pokusa nije bilo moguće primjereno mjeriti temperaturu uzoraka povrća te nije moguće napraviti istu usporedbu tijekom vrijednosti  $D_{ef}$  i temperature materijala. Međutim, prema rezultatima istraživačkog rada Trichaiyaporna i suradnika [158] dobivenim za sušenje šećera (šećerne repe) konvekcijskim načinom u fluidiziranom sloju, može se pretpostaviti da je kretanje temperature u fluidiziranom sloju i u ovom radu imalo sličan tijek. Naime, dodavanjem uzorka u kolonu za sušenje, došlo je do naglog (zamjetnog) pada temperature u fluidiziranom sloju (od 35 °C do 29 °C), nakon čega je slijedio ponovni porast temperature do početne temperature zraka za sušenje. Slijedom navedenog može se pretpostaviti da je i u ovom slučaju nakon dodavanja uzorka u kolonu u samom fluidiziranom sloju došlo do pada temperature u odnosu na temperaturu zraka na ulazu u kolonu, što se

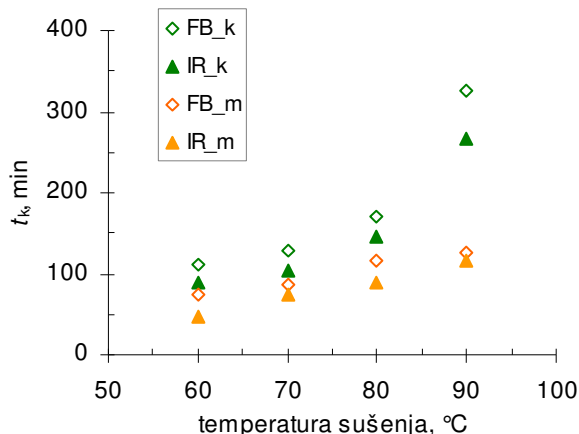


odrazilo i pad  $D_{ef}$ , nakon čeka njegova vrijednost naglo raste u drugom periodu padajuće brzine sušenja zbog pozitivne karakteristike FB načina sušenja, tj. dobre izmjene topline i tvari između materijala i zraka. Također, (prema teorijskim postavkama [17]) može se pretpostaviti da je (pri postavljenim pokusnim uvjetima) zbog vrlo dobrog prijenosa topline u slučaju konvekcijskog sušenja uz fluidizaciju oštija granica između dominacije difuzije tekućine faze i difuzije parne faze nego što je to izraženo kod infracrvenog sušenja gdje su vjerojatno oba procesa difuzije podjednako zastupljena tijekom cijelog vremena sušenja. Ovakve ovisnosti dobivene su uz pretpostavku da nema značajne promjene geometrije i debljine uzorka. Hatamipour i Mowla [159] su dobili sličnu ovisnost  $D_{ef}$  o temperaturi sušenja i vlažnosti materijala kod fluidiziranog sušenja graška i kukuruza, uz malu početnu razliku u odnosu na ovaj rad s obzirom da je sušena mala količina materijala (pojedinačni uzorci) te u ovom slučaju nije bilo promjena (temperaturnih) u fluidizacijskom sloju.

Gabas i suradnici [160] su određivali koeficijent efektivne difuzije vlage tijekom sušenja šljiva kao funkciju sadržaja vlage i kinetike skupljanja (promjene volumena) pri čemu su dobili drugačiju ovisnost  $D_{ef}$  o sadržaju vlage. Naime, ukoliko se zanemari početni period zagrijavanja materijala (kada se  $D_{ef}$  raste) ta ovisnost gotovo da je za niže temperature (50-60 °C) linearna uz kontinuirano smanjivanje  $D_{ef}$  s opadanjem vlažnosti. Na isti način, Hernández i suradnici [34] određivali su  $D_{ef}$  za sušenje manga i kasave pri čemu su vrijednosti  $D_{ef}$  bile 1,6-2 puta veće kada skupljanje nije uzeto u obzir (analogno rezultatima Rahmana i Kumara [132]). U oba prethodna istraživanja zabilježen je nagli pad vrijednosti  $D_{ef}$  ispod  $\Phi = 0,05$  što je prema Capristeu, Whitakeru i Rotsteinu (1988.) [34] posljedica gubitka funkcionalnosti stanične strukture, odnosno narušavanja integriteta staničnog zida te migriranja i aglomeriranja otopljenih, niskomolekularnih tvari u blizini površine što dodatno povećava otpor transportu vlage.

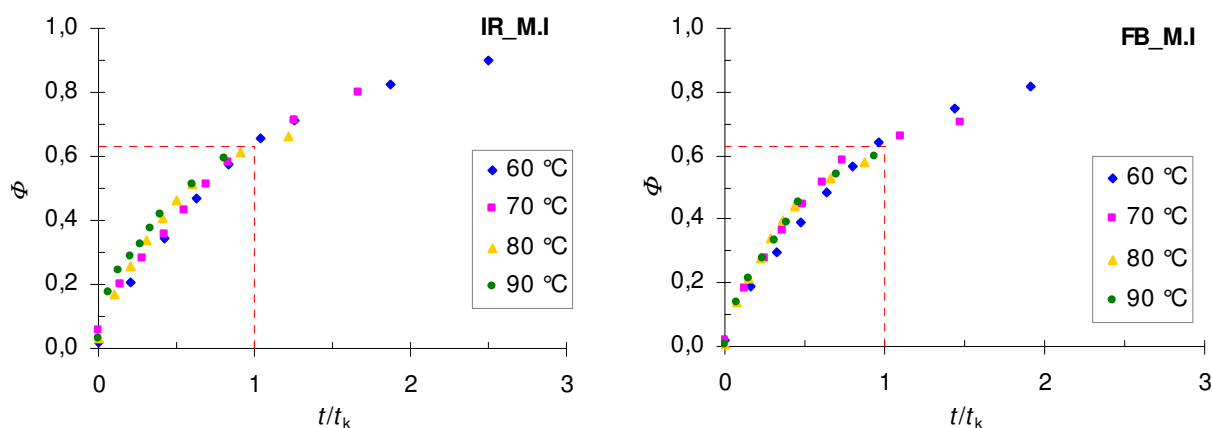
Srikiatden i Roberts [161] su, prema dobivenim rezultatima, zaključili da je ovisnost efektivne difuzije o temperaturi uzorka značajnija od ovisnosti o vlažnosti i skupljanja uzoraka krumpira i mrkve tijekom konvekcijskog sušenja.

Kod rehidracije na isti način kao i kod sušenja, kombinacijom procijenjenih parametara modela prema izrazima (5.1-6) dobiju se vremena  $t_k$ , čije se vrijednosti ovisno o modelu i uvjetima sušenja međusobno nešto razlikuju. Ovisnost  $t_k$  ovisnost o temperaturi sušenja prikazana je na *Slici 5.9* iz koje se vidi da se to vrijeme kod rehidracije uzoraka krumpira dostiže kasnije u odnosu na uzorke mrkve pri svim uvjetima sušenja, da porastom temperature sušenja kod oba načina sušenja raste i vrijeme  $t_k$ .



**Slika 5.9** Ovisnost kritičnog vremena rehidracije ( $t_k$ ) o temperaturi sušenja i načinu sušenja uzoraka povrća prije rehidracije [FB – konvekcijsko sušenje s fluidizacijom; IR – infracrveno sušenje; k – krumpir; m – mrkva]

Uvrštavanjem vrijednosti  $t_k$  u izraze (3.16-22) za izračunavanje  $(1-\Phi)$  ponovo se dobivaju vrijednosti od 0,368, što odgovara vrijednost bezdimenzionalnoj vlažnosti ( $\Phi$ ) od 0,632 koja će se rehidracijom dostići za vrijeme rehidracije:  $t/t_k = 1$  (Slika 5.10). I su slučaju rehidracije vjerojatno u ovom vremenu dolazi do promjene prevladavajućih mehanizama i brzine difuzije vlage kroz materijal.



**Slika 5.10** Ovisnost vlažnosti uzoraka mrkve (uzorak M.I) tijekom rehidracije o bezdimenzionalnom vremenu ( $t/t_k$ ) za različite temperature i načine sušenja prema eksperimentalnim podacima

## 5.6. Promjene svojstava povrća uzrokovane sušenjem/rehidracijom

Sušenje je postupak konzerviranja/prerade povrća, koji nužno uključuje primjenu povišenih temperatura u cilju smanjivanja vlage prehrambenom materijalu čime se postiže

inhibiranje/zaustavljanje fizioloških, kemijskih i mikrobioloških promjena te namirnica čini pogodnom za transport, skladištenje i čuvanje kroz duži period ili prikladnom za daljnju preradu. Uz navedene poželjne učinke, sušenje ima za posljedicu i neželjene promjene svojstava hrane, koje sušeni proizvod u većoj ili manjoj mjeri razlikuje od ishodne sirovine, a koje se prilagodbom pripreme sirovine te načina i uvjeta sušenja nastoji svesti na minimum.

U ovom radu nije provedena prethodna - dodatna (fizikalna i/ili kemijska) obrada povrća prije sušenja. Očišćeno i usitnjeno svježe povrće sušeno je određeno vrijeme u prethodno ispitivanim uvjetnim (sušenje: FB, IR; (60-90) °C) pri čemu je dobiveno povrće sa smanjenim udjelom vlage ( $10\% \pm 2\%$ ). Obzirom na navedeno, očekivane su promjene svojstva povrća (u odnosu na sirovinu) radi čega je i provedeno određivanje nekih kvalitativnih svojstava s ciljem procjene utjecaja načina sušenja i temperature sušenja na nastale promjene uzrokovane uvjetima sušenja. Na ovaj način dobiveni rezultati mogu poslužiti kao temelj za daljnja istraživanja tehnoloških postupaka kojima je svrha očuvanje izvornih svojstava hrane tijekom sušenja.

Svi provedeni postupci sušenja rezultirali su manjim ili većim promjena određivanih kvalitativnih svojstava povrća, pri čemu je „stupanj“ nastalih promjena pojedinog svojstva bio pod utjecajem načina sušenja i/ili temperature sušenja. Analizom varijance (dvofaktorijalni pokus) procijenjena je značajnost utjecaja pojedinog faktora (temperature i načina sušenja) na određivano svojstvo, kao i način njihova utjecaja, tj. da li su oni djelovali nezavisno jedan o drugome ili je njihovo utjecaj bio međuzavisan. U *Tablici 5.4* dan je sumarni pregled statističke obrade podataka prikazanih u poglavlju 4.3., a koji naglašava faktor/faktore s presudnim utjecajem na promjenu određenog svojstva.

**Tablica 5.4** Utjecaj i način djelovanja temperature sušenja i/ili načina sušenja na pojedina kvalitativna svojstva krumpira i mrkve sušenih pri zadanim uvjetima

POVRĆE	KVALITATIVNO SVOJSTVO	UTJECAJ FAKTORA*		
		nezavisno djelovanje		zavisno djelovanje
		način sušenja	temperatura sušenja	interakcija način/temperatura
KRUMPIR	<i>Strukturno svojstvo</i> - rehidrationski doseg - promjena volumena: sušeni uzorak rehidratirani uzorak	x - -	x x x	x x x
	<i>Optičko svojstvo</i> - ukupna promjena boje: sušeni uzorak rehidratirani uzorak	x x	x x	x x
	<i>Teksturalno svojstvo</i> - maksimalna sila kompresije	-	-	x
	<i>Nutritivno svojstvo</i> - sadržaj ukupnih fenolnih tvari - antioksidacijska aktivnost	x x	- -	x x
MRKVA	<i>Strukturno svojstvo</i> - rehidrationski doseg - promjena volumena: sušeni uzorak rehidratirani uzorak	x - x	x x x	x x -
	<i>Optičko svojstvo</i> - ukupna promjena boje: sušeni uzorak rehidratirani uzorak	x -	x -	x -
	<i>Teksturalno svojstvo</i> - maksimalna sila kompresije	-	x	-
	<i>Nutritivno svojstvo</i> - sadržaj ukupnih fenolnih tvari - antioksidacijska aktivnost	x x	x x	x -

\* (x) utjecaj je statistički značajan; (-) utjecaj statistički nije značajan

#### **Rehidrationska svojstva sušenog krumpira (Slike 4.51-52) i mrkve (Slike 4.65-66)**

Brzina rehidrationske i doseg rehidrationske važni su pokazatelji nastalih promjena uzrokovanih sušenjem. Sušenje povrća pri postavljenim uvjetima rezultiralo je nešto slabijim rehidrationskim svojstvima krumpira nego mrkve. Tijekom rehidrationske pri 26 °C u trajanju od 120 minuta uzorci krumpira povećali su svoju masu u prosjeku 1,9-2,7 puta ovisno o uvjetima sušenja, dok su sušeni uzorci mrkve nakon rehidrationske imali 4,5-5,7 puta veću masu. Iako je rehidrationskom ostvareno relativno malo povećanje volumena (osobito krumpira), doseg rehidrationske od 59-85% (krumpir), odnosno 88-92% (mrkva) vlažnosti svježeg povrća može se smatrati zadovoljavajućim s obzirom na uvjete rehidrationske (26 °C, bez agitiranja rehidrationskog medija). Khiraisheh i suradnici [162] proveli rehidrationsku mikrovalno i konvekcijski sušenih uzorka krumpira u ključaloj vodi tijekom 45 minuta pri čemu su dobiveni rehidrationske omjeri u rasponu vrijednosti 2,57-2,89 uz napomenu autora da je sušenje krumpira uz primjenu veće

energije mikrovalnog zagrijavanja uzrokovalo želatinizaciju škroba što je utjecalo na smanjenje stupnja rehidracije. Pojava želatinizacije škroba je značajna i u ovom radu te je vjerojatni razlog slabijih rehidrationskih svojstva krumpira u odnosu na mrkvu imajući na umu njihovu različitu primarnu strukturu i sastava, čemu najviše doprinosi različiti udio škroba u krumpiru i mrkvi. Doseg rehidracije krumpira bio je ovisan i o načinu sušenja i o temperaturi sušenja uz njihovo zavisno djelovanje (*Tablica 4.25*), dok je kod rehidracije mrkve utjecaj temperature sušenja bio ovisan o načinu sušenja bez značajnog (nezavisnog) utjecaja načina sušenja (*Tablica 4.36*). Slične rehidrationske omjere (5,62-6,03) za mrkvu sušenu u fluidiziranom sloju (50-70 °C) postigli su Prakas i suradnici [38], ali uz povećanje rehidrationskog omjera s povećanjem temperature sušenja. Postojeće razlike u temperaturnoj ovisnosti proizlaze iz činjenice da su Prakash i suradnici prije sušenja uzorke mrkve blanširali, a rehidrationsku su proveli potapanjem uzoraka su destiliranu ključalu vodu u trajanju od 5 minuta.

Marabi i suradnici [100] u svom radu su također zabilježili značajan utjecaj načina sušenja (konvekcijsko sušenje i sušenje smrzavanjem) na strukturalna i rehidrationska svojstva (blanširane) mrkve pri čemu je sušenje smrzavanjem dalo proizvod s poroznijom strukturom, koji je imao veću brzinu upijanja vode i veći rehidrationski kapacitet. Uspoređivanjem utjecaja načina sušenja (infracrveno, konvekcijsko, mikrovalno) na kvalitativna svojstva (blanširane, a potom sušene) mrkve, Baysal i suradnici [99] bilježe male razlike dostignutog rehidrationskog kapaciteta, pri čemu je najveći kapacitet imao uzorak mrkve sušen infracrvenim zagrijavanjem, potom mikrovalnim zagrijavanjem, a najmanji konvekcijski sušen uzorak.

### ***Boja i promjena boje sušenog i rehidratiranog povrća***

Boja svježih, sušenih i rehidratiranih uzoraka krumpira i mrkve određena je objektivno, mjerenjem parametar ( $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ ) CIE- $L^*a^*b^*$  sistema (*Slike 4.53, 4.67*), koji su poslužili za određivanje tri osnovna svojstva boje svjetline, kromatičnosti i tona boje te njihovih promjena (*Slike 4.55, 4.69*), kao i ukupne promjene boje sušenog i rehidratiranog povrća u odnosu na svježe povrće (*Slike 4.54, 4.68*). Osim navedenih svojstava boje određen je i indeks posmeđivanja (*Slike 4.56, 4.70*), koji mogu poslužiti kao pokazatelj enzimskog/neenzimskog posmeđivanja [135].

Ukupna promjena boje sušenog povrća bila je jasno uočljiva za ljudsko oko ( $\Delta E_{ab} > 6$  (28)), a ovisila je i o temperaturi i o načinu sušenja uz postojanje njihovog zavisnog djelovanja (*Tablica 4.26*), tj. različitog utjecaja temperature sušenja na promjenu boje povrća kod konvekcijskog sušenja u fluidiziranom sloju (FB) u odnosu na infracrveno (IR) sušenje. Rehidrationskom sušenih uzoraka ponovo je došlo do promjene boje, pri čemu je ukupna promjena

boje u odnosu na svježi uzorak bila znatno manja, tj. za prosječno ljudsko slabo uočljiva do uočljiva ( $1 < \Delta E_{ab} < 6$  (28)). Ukupnu promjenu boje u potpunosti je pratila i promjena tona boje ( $R = 0,9969-1,0000$ ), dok je promjena svjetline boje imala također potpunu, ali negativnu korelaciju ( $R = -(0,9887-0,9973)$ ), odnosno svi sušeni i rehidratirani uzorci su bili svjetliji u odnosu na svježe uzorke. Zabilježene su i promjene zasićenja boje ( $\Delta C^*$ ), koje su za uzorke mrkve također bile u potpunoj korelaciji s ukupnom promjenom boje, dok su za uzorke krumpira promjene zasićenja boje bile manje ovisne o temperaturi i načinu sušenja, i rehidraciji.

Tijekom sušenja, vlaga se iz središta materijala transportira prema van, a zajedno s njom na površinu dopijevaju i otopljene tvari, koje tako postaju podložnije promjenama uslijed djelovanja povišene temperature, svjetlosti i kisika. Vidljiva posljedica tih promjena je i promjena boje površine materijala. Rehidracijom dolazi do djelomičnog otapanja tvari (izluživanja) te se na taj način vjerojatno otapaju i nativni (u vodi topivi) pigmenti i novonastale obojane tvari pri čemu se boja površine ponovo mijenjala. Osim toga, sadržaj vode u čvrstom prehrambenom materijalu značajno utječe na boju istog. Veći sadržaj slobodne vode u povrću povećava dojam sjajnosti, svježine i obojenosti zbog promjene indeksa refleksije u slučaju kada voda ispunjava površinske pore nego kada su pore ispunjene zrakom. Uklanjanjem vode prehrambeni materijal postaje „koncentriraniji“ a time i njegova boja tamnija (manje svjetla) i zasićenija [93].

Kod FB sušenja krumpira ukupna promjena boje bila je veća (19,8-22,8) i ovisnija o temperaturi sušenja, nego kod IR sušenja (11,9-16,6), ali je u oba slučaja kod više temperature sušenja promjena temperature bila manja. Najveći doprinos ( $R = 0,9937$ ) ovoj ukupnoj promjeni boje je smanjivanje vrijednosti  $L^*$  parametra, odnosno smanjivanje svjetline (tamnjenje) krumpira s povećavanjem temperature sušenja. Nakon rehidracije ukupna promjena boje kretala se u rasponima (2,2-12,6) za FB sušene, odnosno (2,9-5,1) za IR sušene uzorke u ovisnosti o temperaturi sušenja. Sličan utjecaj na ukupnu promjenu boje rehidratiranih uzoraka imala su oba faktora (temperatura i način sušenja), te je ponovo zabilježena visoka pozitivna korelacija s parametrom  $L^*$  ( $R = 0,9928$ ).  $BI$  vrijednosti su rasle s povećanjem temperature sušenja uz nešto veće vrijednosti kod IR sušenja (i kod sušenih i kod rehidratiranih) uzoraka krumpira, a stupanj promjene indeksa posmeđivanja u odnosu na vrijednosti svježih uzoraka ovisilo je i o temperaturi i o načinu sušenja te je zabilježena značajna razlika između pojedinih uzoraka istog pokusa (*Tablica 4.27*).

Uvjeti sušenja na istovjetan način utjecali su na ukupnu promjenu boje sušenih i rehidratiranih uzoraka mrkve uz nešto veće vrijednosti kod sušenih uzoraka od (18,9-28,5) za FB sušenje,

odnosno (20,2-27,9) za IR sušenje uz značajan doprinos promjene svjetline u smjeru njenog povećanja ( $R = 0,9982$ ).

Chua i Chou [29] su, u cilju ispitivanja utjecaja načina sušenja (konvekcijsko, mikrovalno, infracrveno) na neenzimsko posmeđivanje, uzorke krumpira i mrkve prethodno obradili s 2%-tnom otopinom  $\text{NaHSO}_3$  kako bi spriječili enzimsko posmeđivanje. Pri postavljenim uvjetima sušenja ukupna promjena boja ( $\Delta E_{ab}$ ) ovisila je o načinu sušenja te se kretala u rasponu vrijednosti 5,1-14,8 za krumpir, odnosno 2,7-13,1 za mrkvu. Značajan utjecaj načina sušenja i temperature sušenja na promjenu boje sušenih uzoraka mrkve i krumpira u svom radu zabilježili su i Krokida i suradnici [163, 164], pri čemu prije sušenja povrće nije bilo dodatno obrađivano u cilju sprječavanja enzimskog/neenzimskog posmeđivanja. Pri postavljenim pokusnim uvjetima sušenja ukupna promjena boje ( $\Delta E_{ab}$ ) povećavala se s povećanjem temperature sušenja te ja za krumpir iznosila 14,5-40,7, dok su uzorci mrkve sušene na isti način imale nešto manje promjene boje mrkve 8,5-25,0. Također, i Baysal i suradnici [99] bilježe značajan utjecaj načina sušenja (mikrovalno, infracrveno, konvekcijsko) na ukupnu promjenu boje (10,98-17,93) i promjenu kromatičnosti (10,87-15,78) prethodno blanširanih (3 min/98 °C) uzoraka mrkve, dok nije bilo značajne promjene tona boje (*hue* vrijednost) u odnosu na svježju mrkvu.

### ***Promjena volumena sušenog i rehidratiranog povrća***

Tijekom sušenja temperatura sušenja je imala značajan utjecaj na smanjenje volumena sušenih i rehidratiranih uzoraka povrća, pri čemu je promjena volumena uzoraka mrkve nakon sušenja iznosila 90-92%, a krumpira 79-84% početnog volumena (*Tablice 4.28, 4.39; Slike 4.57, 4.71*), dok je rehidracijom volumen sušenih uzoraka mrkve povećan u prosjeku za 5-7 puta, a krumpira za 2,5-3 puta (*Slike 4.58, 4.72*), odnosno nakon rehidracije volumeni uzoraka su iznosili ~60% volumena prije sušenja. Promjene volumena uzoraka oba povrća u skladu su s promjenama sadržaja vlage/vode, što odgovara viskoelastičnoj prirodi prehrambenog materijala uslijed koje dolazi do narušavanja primarne strukture materijala tijekom sušenja [160]. Mrkva je imala veću početnu vlažnost u odnosu na krumpir te joj je morala biti uklonjena i veća količina vlage do smanjenje njenog udjela na 10%, a tijekom rehidracije, zbog vjerojatno poroznije strukture s manjim strukturnim promjenama, došlo do upijanja veće količine vlage i povećanje volumena uzoraka mrkve bilo je veće. Promjena volumena (skupljanje) uzoraka tijekom sušenja zapažena je i u drugim istraživanjima gdje je ta promjena bila linearna s promjenom vlažnosti i malo ovisna o temperaturi sušenja kod konvekcijskog sušenja šljiva [160], konvekcijskog sušenja krumpira [9], odnosno neovisna o temperaturi sušenja, debljini uzoraka u obliku cilindra i inertnog materijala kod konvekcijskog sušenja mrkve u fluidiziranom sloju [165].

### ***Promjena teksturalnih svojstava povrća***

Promjena teksturalnih svojstava povrća uzrokovanih sušenjem i rehidracijom procijenjena je određivanjem sile jednosmjerne kompresije uzoraka svježeg (*Slike 4.59, 4.73*) i rehidratiranog povrća (*Slike 4.60, 4.74*). Prosječne maksimalne sile potrebne za 15%-tnu kompresiju svježih uzoraka krumpira i mrkve iznosile su oko 49 N, odnosno 53 N, dok je pod istim uvjetima kompresije rehidratiranih uzoraka potrebna sila bila 9-10 puta manja (*Tablice 4.30, 4.41*). Smanjenje sile izraženo u postotku iznosilo je 83-89% za krumpir, odnosno 88-91% za mrkvu (*Slike 4.61, 4.75*) pri čemu je kod krumpira zabilježen samo zavisan utjecaj temperature i načina sušenja na te promjene, a kod mrkve prevladavajući utjecaj temperature sušenja (*Tablice 4.31, 4.42*). Ove značajne promjene potrebne sile za 15%-tnu kompresiju označavaju i značajnu promjenu strukturnih svojstava povrća uzrokovanih sušenjem i rehidracijom. Vjerojatno je nastalo „mekšanje tkiva“ povezano s gubitkom staničnog turgora i stupnjem promjena pektinskih tvari (depolimerizacija, deesterifikacija) u staničnom zidu i interlamelarnoj regiji više nego sa stupnjem želatinizacije škroba [166]. Snižavanjem aktiviteta vode (sušenjem) u namirnicama povećava se veza između molekula vode i prisutnih makromolekula što značajno smanjuje mobilnost malih molekula i makromolekula, a hrana postaje hrskava i krhka. Ponovno povećavanje sadržaja vode (rehidracija), odnosno prisutnost vode u „većoj količini“ povećava topivost i mobilnost polimernih lanaca što dovodi do promjena mehaničkih svojstava materijala, tj. on gubi hrskavost, tvrdoću i čvrstoću te postaje mekan [93].

Za potpuniji uvid u nastale promjene teksturalnih svojstava potrebno bi bilo provesti i neke druge testove za procjenu teksturalnih svojstava kao što su čvrstoća, elastičnost i dr.

### ***Promjena sadržaja ukupnih fenolnih tvari i antioksidacijske aktivnosti***

Kod svih tehnoloških postupaka obrade prehrambenog materijala mogu se očekivati promjene njezinih nutritivnih svojstava, jer već pri pranju, čišćenju i usitnjavanju sirovine započinju fizikalno-kemijske promjene njezinih sastojaka. Fenolne tvari prisutne u povrću (iako ne u velikom udjelu) od izrazitog su interesa za ljudsku prehranu zbog svoje antioksidacijske aktivnosti te ih je potrebno i zadržati u što većoj mjeri tijekom sušenja hrane. Udio ukupnih fenolnih tvari i njihovo antioksidacijsko djelovanje određeno je njihovom ekstrakcijom i dokazivanjem u ekstraktima svježeg i sušenog povrća. Prosječni sadržaj ukupnih fenolnih tvari (izražen ekvivalentima galne kiseline) u svježem krumpiru iznosio je 3,26 g<sub>GEA</sub>/g<sub>st</sub>, dok je svježa mrkva sadržavala nešto veću količinu fenolnih tvari (11,78 g<sub>GEA</sub>/g<sub>st</sub>). U ekstraktima sušenog povrća zabilježeno je povećanje sadržaja ukupnih fenolnih tvari u odnosu na svježe povrće (kod



krumpira do 70%, a kod mrkve do 40%) što prvenstveno ovisilo o načinu sušenja (*Tablice 4.32, 4.33, 4.43, 4.44*). I kod krumpira i kod mrkve veći sadržaj ukupnih fenolnih tvari uglavnom su imali uzorci sušeni IR sušenjem nego FB sušeni uzorci pri istoj temperaturi sušenja (*Slike 4.62, 4.76*). Obzirom da je sušenjem došlo do povećanja sadržaja ukupnih fenolnih tvari očekivano je dokazano i povećanje antioksidacijske aktivnosti ekstrakata sušenog u odnosu na ekstrakte svježeg povrća (*Slike 4.62, 4.77*) uz analognu statističku značajnost utjecaja temperature i načina sušenja. Međutim, veći sadržaj ukupnih fenolnih tvari nije pratilo i jednako povećanje antioksidacijske aktivnosti (*Slike 4.64, 4.78*), koja je iznosila oko 0,4 g<sub>DPPH</sub>/g<sub>st</sub> bez obzira na povrće, temperaturu i način sušenja, iako su sušeni uzorci mrkve sadržavali oko 3-4 puta više ukupnih fenolnih tvari. Osim toga, antioksidacijska sposobnost uzoraka krumpira sušenih IR sušenjem opadala je s povećanjem temperature sušenja. Razlozi za ovako slabu korelaciju ( $R < 0,40$ ) između ukupnih fenolnih tvari i antioksidacijske aktivnosti dokazanih u ekstraktima povrća, mogu biti višestruki. Moguće je da su uvjeti sušenja uzrokovali degradaciju visokoaktivnih nativnih fenolnih tvari i nastajanje manje antioksidacijski aktivnih tvari, što je dovelo do povećanja sadržaja ukupnih fenolnih tvari uz gotovo nepromijenjenu antioksidacijsku aktivnost. Moguće je da je tijekom određivanja ukupnih fenolnih tvari došlo do interferencije nekih drugih (ne-fenolnih) tvari iz ekstrakta kao što su proteini, askorbati i karotenoidi, koji značajno ne pridonose antioksidacijskoj aktivnosti [118], ali mogu stupati u reakciju s Folin-Ciocalteuovim reagensom [137]. Za potvrđivanje navedenih pretpostavki bilo bi potrebno provesti kvalifikaciju i kvantifikaciju individualnih (ekstrahiranih) fenolnih tvari nekom od kromatografskih metoda analize. Također, moguće je da provedeni DPPH-test (pri analitičkim uvjetima) nije dao jasnu sliku stvarne antioksidacijske aktivnosti, te bi bilo poželjno antioksidacijsku aktivnost ekstrakata odrediti i drugim testovima (npr. ABTS-test, TEAC, FRAP) [124].

## **6. ZAKLJUČCI**

Sušenjem mrkve i krumpira pri četiri različite temperature (60-90 °C) na dva različita načina zagrijavanja materijala i odvođenja vlage od materijala (konvekcijsko sušenje uz fluidizaciju i infracrveno sušenje) dobiveni su uzorci koji su rehidratirani te su im određena neka kvalitativna svojstva. Na temelju dobivenih eksperimentalnih rezultata te njihovom numeričkom i statističkom obradom analizirana je primjenjivost različitih matematičkih modela za opisivanje kinetike sušenja i rehidratacije, kao i utjecaj izbora matematičkog modela na procijenjene vrijednosti koeficijenta efektivne difuzije, te se mogu donijeti slijedeći zaključci:

- Cjelokupni procesi sušenja bez obzira na postavljene uvjete sušenja krumpira i mrkve odvijali su se u periodu padajuće brzine sušenja, što difuziju označava kao glavni mehanizam prijenosa mase (vlage) kroz materijal;
- Način sušenja i temperatura sušenja su imali utjecaja na brzinu sušenja povrća:
  - povećanjem temperature sušenja povećavala se i brzina sušenja te je vrijeme sušenja potrebno za dostizanje jednake vlažnosti materijala bio kraće bez obzira na način zagrijavanja materijala,
  - zbog intenzivne izmjene topline i tvari između materijala i zagrijanog zraka, konvekcijsko sušenje povrća u fluidiziranom sloju bilo je brže od infracrvenog sušenja pri svim temperaturama sušenja,
  - nisu bile zabilježene značajne razilke u kinetici sušenja mrkve i krumpira;
- Kinetika rehidratacije sušenog povrća bila je karakteristična za higroskopne porozne materijale s velikom početnom brzinom (kapilarno upijanje), nakon koje je slijedio i naglim pad brzine te postepeno približavanje ravnotežnom stanju,
  - način sušenja, temperatura sušenja i vrsta povrća imali su utjecaja na kinetiku rehidratacije, koja je provedena potapanjem sušenog povrća u vodu sobne temperature;
  - tijekom dva sata rehidratacije nije dostignuto ravnotežno stanje te se rehidratacije nije mogla smatrati potpunom;
- Usporedba osam jednočlanih matematičkih modela (pojednostavljeni Fick, Lewis, Page, modificirani Page, Sander, Peleg, Henderson-Pabis, modificirani Henderson-Pabis) za opisivanje kinetike sušenja i rehidratacije pokazala je da najbolje slaganje eksperimentalnih podataka i krivulja modela (za oba procesa) daju predložena modifikacija

Henderson-Pabisova modela;  $\Phi = G' \cdot \exp(-S' \cdot t^N)$  i Pageov model:  $\Phi = \exp(-k \cdot t^n)$ , za čije parametre su određene funkcionalne ovisnosti o temperaturi sušenja koje su uspješno korištene za simulaciju ušenja i predviđanje potrebnog vremena sušenja,

- parametri oba modela, koji u sebi sadrže dimenziju vremena i predstavljaju konstante sušena,  $S'$  i  $k'$ , linearno su rasli s povišenjem temperature sušenja kod konvekcijskog sušenja u fluidiziranom sloju, a kod infracrvenog sušenja ta ovisnost je bila eksponencijalna, dok su preostali parametri bili ovisni samo o načinu sušenja,
  - kod procesa rehidracije vrijednosti svih parametara modificiranog Henderson-Pabis modela bili su ovisni o načinu na koji je povrće bilo sušeno, dok su parametri  $n'$  (Page model) i  $N$  bili ovisni i o načinu i o temperaturi sušenja, odnosno o svojstvima sušenog povrća, koja su bila uvjetovana režimima sušenja;
- Kinetika sušenja i rehidracije ispitivanog povrća može se, uz određeno odstupanje (poglavito u prvom dijelu procesa) i različitu korelaciju opisati i preostalim modelima te su i oni uzeti u obzir za procijenu efektivnog koeficijeta difuzivnosti vlage,
- efektivni koeficijent difuzivnosti vlage tijekom sušenja rastao je s temperaturom sušenja, bio je ovisan o načinu sušenja (veće vrijednosti za konvekcijsko sušenje uz fluidizaciju), a neovisan o vrsti povrća,
  - kod rehidracije efektivni koeficijent difuzije je također ovisio o temperaturi sušenja (smanjivao se s porastom temperature sušenja), bio je niži kod povrća sušenog infracrvenim zagrijavanjem, a nije se značajno razlikovao za krumpir i mrkvu,
  - vrijednosti koeficijentata efektivne difuzije vlage tijekom sušenja povrća procijenjene prema pojednostavljenom Fickov, Lewisov i Pageovom modelu međusobno se nisu statistički značajno razlikovale. Veće (0,3-25 puta kod sušenja, odnosno 0,3-30 puta kod rehidracije), ali međusobno slične, vrijednosti procijenjene su prema Dincer-Dostovom prijedlog iz Henderson-Pabisova i modificiranog Henderson-Pabis modela,
  - vrijednosti energije aktivacije efektivne difuzije vlage (< 36 kJ/mol) također upućuju na difuziju kao glavni mehanizam prijenosa mase tijekom sušenja/rehidracije;
- Predloženom kombinacijom parametara svakog ispitivanog modela može se odrediti kritično vrijeme  $t_k$ , koje je za određene uvijete sušenja bilo jednako za mrkvu i krumpir bez obzira na

model prema kojemu je određeno, te je uvijek odgovaralo vrijednosti bezdimenzionalne vlažnosti od 0,368 kod sušenja, odnosno 0,632 kod rehidracije,

- stavljenjem vlažnosti materijala, brzine sušenja i temperature uzoraka u ovisnost s bezdimenzionalnim vremenom ( $t/t_k$ ), bez obzira na temperaturu sušenja i vrstu povrća, uvijek se za određeni način sušenja dobila po jedna karakteristična krivulja, te se može pretpostaviti da je  $t_k$  ovisno o uvjetima sušenja i geometriji materijala te da vjerojatno odgovara vremenu kada dolazi do promjene prevladavajućeg mehanizma difuzije vlage (difuzija tekućine/pare);
- Sušenje i rehidracija očekivano su uzrokovali promjene kvalitativnih svojstava povrća u odnosu na svježe povrće, pri čemu su značajnosti utjecaja temperature i načina sušenja na pojedina svojstva bile različite. Općenito su „stroži“ uvjeti sušenja (veća temperature sušenja) utjecali na pad rehidracijske sposobnosti i smanjenje ukupne promjene boje, te na povećanje sadržaja ukupnih fenolnih tvari u sušenom povrću,
  - uzimanjem u obzir “ukupnu” promjenu kvalitete (promjene svih ispitivanih svojstava), nije zabilježena statistički opravdana razlika između uzoraka istog povrća sušenih pri različitim režimima sušenja,
  - nisu zabilježene značajne razlike “ukupne” promjene ispitivanih svojstava između krumpira i mrkve bez obzira na režim sušenja (način sušenja + temperatura sušenja).

## **7. LITERATURA**

1. I. Dincer, M.M. Hussain. Development of a new Biot number and lag factor correlation for drying applications. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 47, 653-658, 2004.
2. S.M. Alzamora, A. Nieto, M.A. Castro. Structural effects of blanching and osmotic dehydration pretreatments on air drying kinetics of fruit tissues. U *Transport phenomena in food processing*. J. Welty-Chanes, J.F. Véllez-Ruiz, G.V. Barbosa-Cánovas.(ur.), Boca Raton, London, New York, Washington D.C. 69-82, 2003.
3. A. Ibarz.,G.V. Barbosa-Cánovas. *Unit operations in food engineering*. CRC Press, Boca Raton, London, New York, Washington D.C. 2003.
4. D. Marinos-Kouris, Z.B. Maroulis. Transport properties in the drying of solids. U *Handbook of industrial drying*. A.S. Mujumdar.(ur.), New York. 113-160, 1995.
5. W.A.M. McMinn, M.A.M. Khraisheh, T.R.A. Magee. Modelling the mass transfer during convective, microwave and combined microwave-convective drying of solid slabs and cylinders. *Food Research International* 36, 977-983, 2003.
6. J. Srikiatden, J.S. Roberts. Measuring moisture diffusivity of potato and carrot (core and cortex) during convective hot air and isothermal drying. *Journal of Food Engineering* 74, 143-152, 2006.
7. N.M. Panagiotou, M.K. Krokida, Z.B. Maroulis, G.D. Saravacos. Moisture diffusivity: Literature data compilation for foodstuffs. *International Journal of Food Properties* 7, 273-299, 2004.
8. H. Feng, J. Tang, S.J. Dixon-Warren. Determination of moisture diffusivity of red delicious apple tissues by thermogravimetric analysis. *Drying Technology* 18, 1183-1199, 2000.
9. L. Hassini, S. Azzouz, R. Peczalski, A. Belghith. Estimation of potato moisture diffusivity from convective drying kinetics with correction for shrinkage. *Journal of Food Engineering* 79, 47-56, 2007.
10. B. Singh, A. Kumar, A.K. Gupta. Study of mass transfer kinetics and effective diffusivity during osmotic dehydration of carrot cubes. *Journal of Food Engineering* 79, 471-480, 2007.
11. L.M. Batista, C.A. da Rosa, L.A.A. Pinto. Diffusive model with variable effective diffusivity considering shrinkage in thin layer drying of chitosan. *Journal of Food Engineering* 81, 127-132, 2007.
12. M. Caurie. Hysteresis phenomenon in foods. *International Journal of Food Science and Technology* 42, 45-49, 2007.
13. W.A.M. McMinn, T.R.A. Magee. Studies on the effect of temperature on the moisture sorption characteristics of potatoes. *Journal of Food Process Engineering* 22, 113-128, 1999.
14. P.P. Lewicki. Effect of pre-drying treatment, drying and rehydration on plant tissue properties: A review. *International Journal of Food Properties* 1, 1-22, 1998.
15. N.K. Rastogi, A. Angersbach, K. Niranjana, D. Knorr. Rehydration kinetics of high-pressure pretreated and osmotically dehydrated pineapple. *Journal of Food Science* 65, 838-841, 2000.
16. A. Reyes, P.I. Alvarez, F.H. Marquardt. Drying of carrots in a fluidized bed. I. Effects of drying conditions and modelling. *Drying Technology* 20, 1463-1483, 2002.

17. C.A. Pickles. Drying kinetics of nickeliferous limonitic laterite ores. *Minerals Engineering* 16, 1327-1338, 2003.
18. J. Chirife. Fundamentals of the drying mechanism during air dehydration of foods. *Advances in Drying* 2, 74-101, 1983.
19. H. Desmorieux, N. Decaen. Convective drying of spirulina in thin layer. *Journal of Food Engineering* 66, 497-503, 2005.
20. D. Doulia, K. Tzia, V. Gekas. A knowledge base for the apparent mass diffusion coefficient ( $D_{EFF}$ ) of foods. *International Journal of Food Properties* 3, 1-14, 2000.
21. T.M. Afzal, T. Abe. Some fundamental attributes of far infrared radiation drying of potato. *Drying Technology* 17, 137-155, 1999.
22. T. Abe, T.M. Afzal. Thin-layer infrared radiation drying of rough rice. *Journal of Agricultural and Engineering Research* 67, 289-297, 1997.
23. S. Achariyaviriya, S. Soponronnarit, A. Terdyothin. Diffusion models of papaya and mango glaze' drying. *Drying Technology* 18, 1605-1615, 2000.
24. I.T. Togrul, D. Pehlivan. Modelling of drying kinetics of single apricot. *Journal of Food Engineering* 58, 23-32, 2003.
25. E. Akpinar, A. Midilli, Y. Bicer. Single layer drying behaviour of potato slices in a convective cyclone dryer and mathematical modeling. *Energy Conversion and Management* 44, 1689-1705, 2003.
26. F. Kaymak-Ertekin. Drying and rehydrating kinetics of green and red peppers. *Journal of Food Science* 67, 168-175, 2002.
27. C.C. Seow, K.B. Ng, M.C. BOURNE. Effect of blanching treatments on physico-chemical properties of dehydrated carrots, celery and green beans. *ASEAN Food Journal* 7, 184-188, 1992.
28. J. Wang, K. Sheng. Far-infrared and microwave drying of peach. *LWT - Food Science and Technology* 39, 247-255, 2006.
29. K.J. Chua, S.K. Chou. A comparative study between intermittent microwave and infrared drying of bioproducts. *International Journal of Food Science and Technology* 40, 23-39, 2005.
30. K.P. Sandeep, J. Irudayaraj. Introduction to modeling and numerical simulation. U *Food processing operations modeling. Design and analysis*. J. Irudayaraj.(ur.), New York, Basel. 25-36, 2001.
31. Romano, V.R., Marra, F., Tammara, U. Modelling of microwave heating of foodstuff: study on the influence of sample dimensions with a FEM approach. *Journal of Food Engineering* 71, 231-232, 2005.
32. A.L. Gaston, R.M. Abalone, S.A. Giner, D.M. Bruce. Effect of modelling assumptions on the effective water diffusivity in wheat. *Biosystems Engineering* 88, 175-185, 2004.
33. C.O. Rovedo, C. Suarez, P. Viollaz. Analysis of moisture profiles, mass biot number and driving forces during drying of potato slabs. *Journal of Food Engineering* 36, 211-231, 1998.
34. J.A. Hernandez, G. Pavon, M.A. Garcia. Analytical solution of mass transfer equation considering shrinkage for modeling food-drying kinetics. *Journal of Food Engineering* 45, 1-10, 2000.



35. M.K. Krokida, E. Foundoukidis, Z. Maroulis. Drying constant: Literature data compilation for foodstuffs. *Journal of Food Engineering* 61, 321-330, 2004.
36. H. Togrul. Suitable drying model for infrared drying of carrot. *Journal of Food Engineering* 77, 610-619, 2006.
37. H.O. Menges, C. Ertekin. Thin layer drying model for treated and untreated Stanley plums. *Energy Conversion and Management* 47, 2337-2348, 2006.
38. S. Prakash, S.K. Jha, N. Datta. Performance evaluation of blanched carrots dried by three different driers. *Journal of Food Engineering* 62, 305-313, 2004.
39. I. Doymaz. Convective air drying characteristics of thin layer carrots. *Journal of Food Engineering* 61, 359-364, 2004.
40. V. Demir, T. Gunhan, A.K. Yagcioglu, A. Degirmencioglu. Mathematical modelling and the determination of some quality parameters of air-dried bay leaves. *Biosystems Engineering* 88, 325-335, 2004.
41. K.J. Park, A. Bin, F.P. Reis Brod, T.H.K. Brandini Park. Osmotic dehydration kinetics of pear D'anjou (*Pyrus communis* L.). *Journal of Food Engineering* 52, 293-298, 2002.
42. M. Kashaninejad, A. Mortazavi, A. Safekordi, L.G. Tabil. Thin-layer drying characteristics and modeling of pistachio nuts. *Journal of Food Engineering* 78, 98-108, 2007.
43. R. Dandamrongrak, G. Young, R. Mason. Evaluation of various pre-treatments for the dehydration of banana and selection of suitable drying models. *Journal of Food Engineering* 55, 139-146, 2002.
44. M. Maskan. Microwave/air and microwave finish drying of banana. *Journal of Food Engineering* 44, 71-78, 2000.
45. M. Maskan. Drying, shrinkage and rehydration characteristics of kiwifruits during hot air and microwave drying. *Journal of Food Engineering* 48, 177-182, 2001.
46. T.M. Afzal, T. Abe. Diffusion in potato during far infrared radiation drying. *Journal of Food Engineering* 37, 353-365, 1998.
47. V.T. Karathanos, G. Vilallobos, G.D. Saravacos. Comparison of two methods of estimation of the effective moisture diffusivity from drying data. *Journal of Food Science* 55, 218-231, 1990.
48. S. Sayar, M. Turhan, S. Gunasekaran. Analysis of chickpea soaking by simultaneous water transfer and water-starch reaction. *Journal of Food Engineering* 50, 91-98, 2001.
49. N.K. Rastogi, C.A. Nayak, K.S.M.S. Raghavarao. Influence of osmotic pre-treatments on rehydration characteristics of carrots. *Journal of Food Engineering* 65, 287-292, 2004.
50. M.K. Krokida, D. Marinos-Kouris. Rehydration kinetics of dehydrated products. *Journal of Food Engineering* 57, 1-7, 2003.
51. N. Sanjuán, S. Simal, J. Bon, A. MULET. Modelling of broccoli stems rehydration process. *Journal of Food Engineering* 42, 27-31, 1999.
52. N. Sanjuán, J.A. Cárcel, G. Clemente, A. MULET. Modelling of the rehydration process of broccolli florets. *European Food Research and Technology* 212, 449-453, 2001.
53. V. Mrkić, M. Ukrainczyk, B. Tripalo. Applicability of moisture transfer Bi-Di correlation for convective drying of broccoli. *Journal of Food Engineering* 79, 640-646, 2007.

54. J. Garcia-Rreverter, M.C. BOURNE, A. MULET. Low temperature blanching affects firmness and rehydration of dried cauliflower florets. *Journal of Food Science* 59, 1181-1183, 1994.
55. S. Tomas. Kinetika mikrovalnog i konvekcijskog sušenja poroznih materijala, *Doktorski rad*. Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije Sveučilište u Zagrebu, 1993
56. S. Tomas, D. Skansi, M. Sokele. Kinetika konvekcijskog sušenja poroznih materijala. *Znanstvena praksa u poljoprivredi i tehnologiji* 22, 505-518, 1992.
57. S. Tomas, D. Skansi. Microwave drying of a consolidated slab of raw clay. *Chemical and Biochemical Engineering Quarterly* 8, 63-67, 1994.
58. A. Sander, S. Tomas, D. Skansi. The influence of air temperature on effective diffusion coefficient of moisture in the falling rate period. *Drying Technology* 16, 1487-1499, 1998.
59. D. Skansi, S. Tomas. Microwave drying kinetics of a clay-plate. *Ceramics International* 21, 207-211, 1995.
60. D. Skansi, S. Tomas, I. Pudić, A. Arapović. The influence of pressure and temperature on the kinetics of vacuum drying of ketoprofen. *Drying Technology* 15, 1617-1631, 1997.
61. S. Tomas, D. Skansi. Numerical interpretation of drying curve of food products. *Journal of Chemical Engineering of Japan* 29, 367-370, 1996.
62. D. Velić, M. Planinić, S. Tomas, M. Bilić. Influence of airflow velocity on kinetics of convection apple drying. *Journal of Food Engineering* 64, 97-102, 2004.
63. M. Peleg. An empirical model for the description of moisture sorption curves. *Journal of Food Science* 53, 1216-1219, 1988.
64. N. Abu-Ghannam, B. McKenna. The application of Peleg's equation to model water absorption during the soaking of red kidney beans (*Phaseolus vulgaris* L.). *Journal of Food Engineering* 32, 391-401, 1997.
65. M. Turhan, S. Sayar, S. Gunasekaran. Application of Peleg model to study water absorption in chickpea during soaking. *Journal of Food Engineering* 53, 153-159, 2002.
66. P.A. Sopade, J.A. Obekpa. Modelling water absorption in soybean, cowpea and peanuts at three temperatures using Peleg's equation. *Journal of Food Science* 55, 1084-1087, 1990.
67. T.V. Hung, L.H. Liu, R.G. Black, M.A. Trehwella. Water absorption in chickpea (*C. arietinum*) and field pea (*P. sativum*) cultivars using the Peleg model. *Journal of Food Science* 58, 848-852, 1993.
68. M. Maskan. Effect of processing on hydration kinetics of three wheat products of the same variety. *Journal of Food Engineering* 52, 337-341, 2002.
69. G. Sacchetti, A. Gianotti, M. Dalla Rosa. Sucrose-salt combined effects on mass transfer kinetics and product acceptability. Study on apple osmotic treatments. *Journal of Food Engineering* 49, 163-173, 2001.
70. E. Palou, A. López-Malo, A. Argai, J. Welti. Use of Peleg's equation to osmotic concentration of papaya. *Drying Technology* 12, 965-978, 1994.
71. P.M. Azoubel, F.E.X. Murr. Mass transfer kinetics of osmotic dehydration of cherry tomato. *Journal of Food Engineering* 61, 291-295, 2004.

72. M. Planinić, D. Velić, S. Tomas, M. Bilić, A. Bucić. Modelling of drying and rehydration of carrots using Peleg's model. *European Food Research and Technology* 221, 446-451, 2005.
73. G. Ruíz Díaz, J. Martínez-Monzó, P. Fito, A. Chiralt. Modelling of dehydration-rehydration of orange slices in combined microwave/air drying. *Innovative Food Science and Emerging Technologies* 4, 203-209, 2003.
74. A. Bucić-Kojić, M. Planinić, S. Tomas, M. Bilić, D. Velić. Study of solid-liquid extraction kinetics of total polyphenols from grape seeds. *Journal of Food Engineering* 81, 236-242, 2007.
75. G.D. Saravacos. Mass transfer properties of foods. U *Engineering properties of foods*. M.A. Rao, S.S.H. Rizivi, A.K. Datta.(ur.), Boca Raton, London, New York, Singapore. 327-380, 2005.
76. Mass transfer and diffusion in foods. U *Wiley Encyclopedia of Food Science and Technology*. URL: <http://www.knovel.com>. 1538-1549, 1999. (12.02.2008.)
77. G.H. Kanevce, L.P. Kanevce, G.S. Dulikravich. An Inverse Method for Drying at High Mass Transfer Biot Number. *Proc. HT03 ASME Summer Heat Transfer Conference* 1-7, 2003.
78. T.H. Varzakas, G.C. Leach, C.J. Israilides, D. Arapoglou. Theoretical and experimental approaches towards the determination of solute effective diffusivities in foods. *Enzyme and Microbial Technology* 37, 29-41, 2005.
79. Z.B. Maroulis, G.D. Saravacos, N.M. Panagiotou, M.K. Krokida. Moisture diffusivity data compilation for foodstuffs: Effect of material moisture content and temperature. *International Journal of Food Properties* 4, 225-237, 2001.
80. N. Hamdami, J.Y. Monteau, A. Le Bail. Moisture diffusivity and water activity of part-baked bread at above and sub-freezing temperatures. *International Journal of Food Science and Technology* 41, 33-44, 2006.
81. B. Adhikari, T. Howes, B.R. Bhandari, S. Yamamoto, V. Truong. Application of a simplified method based on regular regime approach to determine the effective moisture diffusivity of mixture of low molecular weight sugars and maltodextrin during desorption. *Journal of Food Engineering* 54, 157-165, 2002.
82. I. Dincer. Modelling for heat and mass transfer parameters in deep-frying of products. *Heat and Mass Transfer/Waerme- und Stoffuebertragung* 32, 109-113, 1996.
83. I. Dincer. Moisture transfer analysis during drying of slab woods. *Heat and Mass Transfer/Waerme- und Stoffuebertragung* 34, 317-320, 1998.
84. A.Z. Sahin, I. Dincer. Prediction of drying times for irregular shaped multi-dimensional moist solids. *Journal of Food Engineering* 71, 119-126, 2005.
85. I. Dincer, M.M. Hussain, A.Z. Sahin, B.S. Yilbas. Development of a new moisture transfer (Bi-Re) correlation for food drying applications. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 45, 1749-1755, 2002.
86. I. Dincer, M.M. Hussain. Development of a new Bi-Di correlation for solids drying. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 45, 3065-3069, 2002.
87. W.A.M. McMinn. Prediction of moisture transfer parameters for microwave drying of lactose powder using Bi-G drying correlation. *Food Research International* 37, 1041-1047, 2004.

88. Z. Bobić, I. Bauman, D. Ćurić. Rehydration ratio of fluid bed-dried vegetables. *Sadhana - Academy Proceedings in Engineering Sciences* 27, 365-374, 2002.
89. M.S. Hatamipour, D. Mowla. Experimental investigation of drying behavior of carrots in a fluidized bed with energy carrier. *Chemical Engineering and Technology* 26, 43-49, 2003.
90. S. Syahrul, F. Hamdullahpur, I. Dincer. Thermal analysis in fluidized bed drying of moist particles. *Applied Thermal Engineering* 22, 1763-1775, 2002.
91. A.K. Datta, M. Almeida. Properties relevant to infrared heating of foods. U *Engineering properties of foods*. M.A. Rao, S.S.H. Rizivi, A.K. Datta.(ur.), Boca Raton, London, New York, Singapore. 209-238, 2005.
92. O.O. Fasina, R.T. Tyler. Infrared heating of biological materials. U *Food processing operations modelinag. Design and analysis*. J. Irudayaraj.(ur.), New York, Basel. 189-224, 2001.
93. P.P. Lewicki. Water as the determinant of food engineering properties. A review. *Journal of Food Engineering* 61, 483-495, 2004.
94. C. Ratti, A.S. Mujumdar. Infrared drying. U *Handbook of Industrial Drying*. A.S. Mujumdar.(ur.), New York. 567-588, 1995.
95. D.G.P. Kumar, H.U. Hebbar, D. Sukumar, M.N. Ramesh. Infrared and hot-air drying of onions. *Journal of Food Processing and Preservation* 29, 132-150, 2005.
96. U.H. Hebbar, M.N. Ramesh. Optimisation of processing conditions for infrared drying of cashew kernels with testa. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 85, 865-871, 2005.
97. K. Pääkkönen, J. Havento, B. Galambosi, M. Pyykkönen. Infrared drying of herbs. *Agricultural and Food Science in Finland* 8, 19-27, 1999.
98. H. Umesh Hebbar, N.K. Rastogi. Mass transfer during infrared drying of cashew kernel. *Journal of Food Engineering* 47, 1-5, 2001.
99. T. Baysal, F. Icier, S. Ersus, H. Yildiz. Effects of microwave and infrared drying on the quality of carrot and garlic. *European Food Research and Technology* 218, 68-73, 2003.
100. A. Marabi, M. Jacobson, S.J. Livings, I.S. Saguy. Effect of mixing and viscosity on rehydration of dry food particulates. *European Food Research and Technology* 218, 339-344, 2004.
101. A. Marabi, S. Livings, M. Jacobson, I.S. Saguy. Normalized Weibull distribution for modeling rehydration of food particulates. *European Food Research and Technology* 217, 311-318, 2003.
102. M.K. Krokida, C. Philippopoulos. Rehydration of dehydrated foods. *Drying Technology* 23, 799-830, 2005.
103. M. Yost, J.M. Abu-Ali, S.A. Barringer. Kinetics of potato color and texture development during baking, frying, and microwaving with the addition of liquid smoke. *Journal of Food Science* 71, 2006.
104. M. Maskan. Kinetics of colour change of kiwifruits during hot air and microwave drying. *Journal of Food Engineering* 48, 169-175, 2001.

105. Y. Pomeranz, C.E. Meloan. Measurement of color. U *Food Analysis: Theory and Practice*. Y.M.C.E. Pomeranz.(ur.), New York. 87-98, 1994.
106. S. Pervan, A. Antonović, M. Humar, A. Straže, Z. Gorišek. Colour chemistry of steamed and boiled walnutwood (*Juglans regia* L.). *Drvna Industrija* 57, 127-133, 2006.
107. Grapho Metronic. Color + Quality Part 3: Color systems.  
<http://www.grapho-metronic.com/content/en/TechNotes/index.html> (12.02.2008.)
108. F.J. Francis. Colorimetric properties of foods. U *Engineering properties of foods*. M.A. Rao, S.S.H. Rizivi, A.K. Datta.(ur.), Boca Raton, London, New York, Singapore. 703-732, 2005.
109. M. Özkan, A. Kirca, B. Cemeroglu. Effect of moisture content on CIE color values in dried apricots. *European Food Research and Technology* 216, 217-219, 2003.
110. R.E. Wrolstad, R.W. Durst, J. Lee. Tracking color and pigment changes in anthocyanin products. *Trends in Food Science and Technology* 16, 423-428, 2005.
111. E. Palou, A. Lopez-Malo, C. Barbosa, J. Welti-Chanes, B.G. Swanson. Polyphenoloxidase activity and color of blanched and high hydrostatic pressure treated banana puree. *Journal of Food Science* 64, 42-45, 1999.
112. M.N. Eshtiaghi, R. Stute, D. Knorr. High-pressure and freezing pretreatment effect on drying, rehydration, texture and color of green beans, carrots and potatoes. *Journal of Food Science* 59, 1168-1170, 1994.
113. M.C. Bourne. *Food texture and viscosity: Concept and measuring*. Academia Press, London, San Diego. 2002.
114. S.S. Roy, T.A. Taylor, H.L. Kramer. Textural and ultrastructural changes in carrot tissue as affected by blanching and freezing. *Journal of Food Science* 66, 176-180, 2001.
115. Y.S. Velioglu, G. Mazza, L. Gao, B.D. Oomah. Antioxidant activity and total phenolics in selected fruits, vegetables and grain products. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 46, 4113-4117, 1998.
116. C. Sánchez-Moreno, J.A. Larrauri, F. Saura-Calixto. A procedure to measure the antiradical efficiency of polyphenols. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 76, 270-276, 1998.
117. K. Zhou, L. Yu. Total phenolic contents and antioxidant properties of commonly consumed vegetables grown in Colorado. *LWT - Food Science and Technology* 39, 1155-1162, 2006.
118. J.A. Vinson, Y. Hao, X. Su, L. Zubik. Phenol antioxidant quantity and quality in foods: Vegetables. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 46, 3630-3634, 1998.
119. C.C. Teow, V. Truong, R.F. McFeeters, R.L. Thompson, K.V. Pecota, G.C. Yencho. Antioxidant activities, phenolic and b-carotene contents of sweet potato genotypes with varying flesh colours. *Food Chemistry* 103, 829-838, 2007.
120. M. Naczki, F. Shahidi. Phenolics in cereals, fruits and vegetables: occurrence, extraction and analysis. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis* 41, 1523-1542, 2006.
121. C. Manach, A. Scalbert, C. Morand, C. sy, L. nez. Polyphenols: Food sources and bioavailability. *American Journal of Clinical Nutrition* 79, 727-747, 2004.

122. H.E. Miller, F. Rigelhof, L. Marquart, A. Prakash, M. Kanter. Antioxidant content of whole grain breakfast cereals, fruits and vegetables. *Journal of the American College of Nutrition* 19,2000.
123. M.S. Alsaikhan, L.R. Howard, J.C. Miller. Antioxidant activity and total phenolics in different genotypes of potato (*Solanum tuberosum*, l). *Journal of Food Science* 60, 3411995.
124. P. Stratil, B. Klejdus, V. Kubáň. Determination of total content of phenolic compounds and their antioxidant activity in vegetables - Evaluation of spectrophotometric methods. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 54, 607-616, 2006.
125. K. Nara, T. Miyoshi, T. Honma, H. Koga. Antioxidative activity of bound-form phenolics in potato peel. *Bioscience, Biotechnology and Biochemistry* 70, 1489-1491, 2006.
126. C.A. Rice-Evans, N.J. Miller, G. Paganga. Antioxidant properties of phenolic compounds. *Trends in Plant Science* 2, 152-159, 1997.
127. Y.C. Huang, Y.H. Chang, Y.Y. Shao. Effects of genotype and treatment on the antioxidant activity of sweet potato in Taiwan. *Food Chemistry* 98, 529-538, 2006.
128. M.C. Nicoli, M. Anese, M. Parpinel. Influence of processing on the antioxidant properties of fruit and vegetables. *Trends in Food Science & Technology* 10, 94-100, 1999.
129. M.C. Nicoli, M. Anese, M.T. Parpinel, S. Franceschi, C.R. Lerici. Loss and/or formation of antioxidants during food processing and storage. *Cancer Letters* 114, 71-74, 1997.
130. AOAC. *U Official methods of analysis*. P. Cunniff.(ur.), Arlington, USA.1995.
131. P.P. Lewicki. Some remarks on rehydration of dried foods. *Journal of Food Engineering* 36, 81-87, 1998.
132. N. Rahman, S. Kumar. Influence of sample size and shape on transport parameters during drying of shrinking bodies. *Journal of Food Process Engineering* 30, 186-203, 2007.
133. URL:<http://www.brucelindbloom.com/index.html?MunsellCalcHelp.html> (12.02.2008.)
134. Đ. Vasilj. *Biometrika i eksperimentiranje u bilinogojstvu*. Hrvatsko agronomsko društvo, Zagreb. 2000.
135. M.S. Rahman. Mass-Volume-Area-Related properties of food. U *Engineering properties of foods*. M.A. Rao, S.S.H. Rizivi, A.K. Datta.(ur.), Boca Raton, London, New York, Singapore. 1-40, 2005.
136. D. Huang, O.U. Boxin, R.L. Prior. The chemistry behind antioxidant capacity assays. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 53, 1841-1856, 2005.
137. A. Waterhouse. Folin-Ciocalteu micro method for total phenol in wine. <http://waterhouse.ucdavis.edu/phenol/folinmicro.htm> (12.02.2008.)
138. P. Molyneux. The use of the stable free radical diphenylpicrylhydrazyl (DPPH) for estimating antioxidant activity. *Songklanakarinn Journal of Science and Technology* 26, 212-219, 2004.
139. S. Hovmand. Fluidized bed drying. U *Handbook of Industrial Drying*. A.S. Mujumdar.(ur.), New York. 195-249, 1995.

140. B. Singh, P.S. Panesar, A.K. Gupta, J.F. Kennedy. Sorption isotherm behavior of osmoconvectively dehydrated carrot cubes. *Journal of Food Processing and Preservation* 30, 684-698, 2006.
141. A. Sander, A. Glasnović. Procjena karakterističnih veličina u procesu sušenja. *Kemija u industriji* 53, 109-115, 2004.
142. J. Wang, Y. Chao. Effect of gamma irradiation on quality of dried potato. *Radiation Physics and Chemistry* 66, 293-297, 2003.
143. J. Wang, Y. Chao. Effect of <sup>60</sup>Co irradiation on drying characteristics of apple. *Journal of Food Engineering* 56, 347-351, 2003.
144. J. Wang, Y.S. Xiong, Y. Yu. Microwave drying characteristics of potato and the effect of different microwave powers on the dried quality of potato. *European Food Research and Technology* 219, 500-506, 2004.
145. A.I. Varnalis, J.G. Brennan, D.B. MacDougall, S.G. Gilmour. Optimisation of high temperature puffing of potato cubes using response surface methodology. *Journal of Food Engineering* 61, 153-163, 2004.
146. L. Ahrné, F. Prothon, T. Funebo. Comparison of drying kinetics and texture effects of two calcium pretreatments before microwave-assisted dehydration of apple and potato. *International Journal of Food Science and Technology* 38, 411-420, 2003.
147. J.I. Mate, M. Zwietering, K. van't Riet. The effect of blanching on the mechanical and rehydration properties of dried potato slices. *European Food Research & Technology* 209, 343-347, 1999.
148. G. Attanasio, L. Cinquanta, D. Albanese, M.D. Matteo. Effects of drying temperatures on physico-chemical properties of dried and rehydrated chestnuts (*Castanea sativa*). *Food Chemistry* 88, 583-590, 2004.
149. L. Hassini, S. Azzouz, A. Belghith. Estimation of the moisture diffusion coefficient of potato during hot-air drying. *Proceedings of the 14th International Drying Symposium B*, 1488-1495, 2004.
150. I. Dincer, S. Dost. A modelling study for moisture diffusivities and moisture transfer coefficients in drying of solid objects. *International Journal of Energy Research* 20, 531-539, 1996.
151. G.S. Saravacos., Z.B. Maroulis. *Transport properties of food*. Marcel Dekker, Inc., New York. 2001.
152. R.L. Earle., D.M. Earle. *Unit operations in food processing*.  
URL:<http://www.nzifst.org.nz/unitoperations/index.htm> (12.02.2008.)
153. A. Sander, D. Skansi, N. Bolf. Heat and mass transfer models in convection drying of clay slabs. *Ceramics International* 29, 641-653, 2003.
154. A. Sander. Komparativna istraživanja kinetike sušenja čvrstih materijala, *Doktorski rad*. Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije u Zagrebu, 2003
155. H. Desmorieux, C. Moyne. Analysis of dryers performance for tropical foodstuffs using the characteristic drying curve concept. *Drying'92* Proceedins of the International Drying Symposium '92, 834-843, 1992.
156. K. Thorvaldsson, H. Janestad. Model for simultaneous heat, water and vapour diffusion. *Journal of Food Engineering* 40, 167-172, 1999.



157. M.A. Ruiz-Cabrera, M.A. Salgado-Cervantes, K.N. Waliszewski-Kubiak, M.A. Alvarado. The effect of path diffusion on the effective moisture diffusivity in carrot slabs. *Drying Technology* 15, 169-181, 1997.
158. S. Trichaiyaporn, D. Steinmetz, J.L. Baxerres, D. Barrelean, C. Laguerie. Cane sugar drying in fluidised bed. *Proc. of Drying '92* 1992.
159. M.S. Hatamipour, D. Mowla. Correlations for shrinkage, density and diffusivity for drying of maize and green peas in a fluidized bed with energy carrier. *Journal of Food Engineering* 59, 221-227, 2003.
160. A.L. Gabas, F.C. Menegalli, J. Telis-Romero. Determination of concentration-dependent effective moisture diffusivity of plums based on shrinkage kinetics. U *Transport Phenomena in Food Processing*. J. Welti-Chanes, J.F. Vález-Ruiz, G.V. Barbosa-Cánovas.(ur.), Boca Raton, London, New York, Washington D.C. 153-168, 2003.
161. J. Srikiatden, J.S. Roberts. Predicting moisture profiles in potato and carrot during convective hot air drying using isothermally measured effective diffusivity. *Journal of Food Engineering* 84, 516-525, 2008.
162. M.A.M. Khraisheh, W.A.M. McMinn, T.R.A. Magee. Quality and structural changes in starchy foods during microwave and convective drying. *Food Research International* 37, 497-503, 2004.
163. M.K. Krokida, Z.B. Maroulis. Structural properties of dehydrated products during rehydration. *International Journal of Food Science and Technology* 36, 529-538, 2001.
164. M.K. Krokida, Z.B. Maroulis. Kinetics on color changes during drying of some fruits and vegetables. *Drying Technology* 16, 667-685, 1998.
165. M.S. Hatamipour, D. Mowla. Shrinkage of carrots during drying in an inert medium fluidized bed. *Journal of Food Engineering* 55, 247-252, 2002.
166. M.D. Alvarez, W. Canet. Kinetics of thermal softening of potato tissue heated by different methods. *European Food Research & Technology* 212, 454-464, 2001.



## ŽIVOTOPIS

Mirela Planinić rođena je 1970. u Osijeku. Nakon osnovne škole, 1989. godine maturirala je na srednjoj medicinskoj školi "Ruđer Bošković" u Osijeku. 1998. godine diplomirala je na Prehrambeno-tehnološkom fakultetu u Osijeku obranivši diplomski rad pod naslovom "Utjecaj procesnih parametara na kvalitetu vina erdutska Graševina kod ultrafiltracije pločastim modulom". 1999. godine upisala je poslijediplomski znanstveni studij Prehrambeno inženjerstvo na Prehrambeno-tehnološkom fakultetu u Osijeku.

Od 05. srpnja 1999. godine zaposlena je na Katedri za tehnološke operacije na Prehrambeno-tehnološkom fakultetu u Osijeku na radnom mjestu asistenta. Aktivno je sudjelovala u radu na po jednom završenom znanstveno istraživačkom i VIP-projektu, trenutno je istraživač na znanstvenom istraživačkom projektu Ministarstva znanosti, obrazovanja i športa – (113-1130471-0338) „Modeliranje i simuliranje procesa sušenja i ekstrakcije u proizvodnji hrane“.

Kao autor/koautor objavila je 4 rada citirana u CC časopisu, 12 radova u zborniku radova s međunarodnog kongresa i 2 rada u zborniku radova s domaćeg kongresa s međunarodnim sudjelovanjem. Aktivno je sudjelovala je na više međunarodnih i domaćih skupova.

Kao član Tajništva skupa sudjelovala je u organizaciji međunarodnih kongresa "Brašno-Kruh" (1999., 2001., 2003., 2005. i 2007.) te je bila jedan od tehničkih urednika Zbornika radova (2003., 2005.) i Zbornika sažetaka (2005., 2007.) s istog kongresa.