



UNIVERZITET U NOVOM SADU

TEHNOLOŠKI FAKULTET



**PRIMENA REVERZIBILNOSTI MATRICA  
USITNJAVANJA I METODE ODZIVNE POVRŠINE ZA  
KONTROLU EFEKATA USITNJAVANJA U  
TEHNOLOŠKOM POSTUPKU MLEVENJA PŠENICE**

DOKTORSKA DISERTACIJA

Mentori:

dr Aleksandar Fišteš

dr Dušan Rakić

Kandidat:

Nemanja Bojanić

Novi Sad, 2021. godine

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA<sup>1</sup>

Vrsta rada:	Doktorska disertacija
Ime i prezime autora:	Nemanja Bojanić
Mentor (titula, ime, prezime, zvanje, institucija)	dr Aleksandar Fišteš, redovni profesor, Tehnološki fakultet, Univerzitet u Novom Sadu dr Dušan Rakić, vanredni profesor, Tehnološki fakultet, Univerzitet u Novom Sadu
Naslov rada:	Primena reverzibilnosti matrica usitnjavanja i metode odzivne površine za kontrolu efekata usitnjavanja u tehnološkom postupku mlevenja pšenice
Jezik publikacije (pismo):	Srpski ( <u>latinica</u> )
Fizički opis rada:	Uneti broj: Stranica <u>135</u> Poglavlja <u>6</u> Referenci <u>174</u> Tabela <u>22</u> Slika <u>37</u> Grafikona <u>-</u> Priloga <u>-</u>
Naučna oblast:	Prehrambeno inženjerstvo
Uža naučna oblast (naučna disciplina):	Inženjerstvo ugljenohidratne hrane
Ključne reči / predmetna odrednica:	povratne matrice usitnjavanja, metoda odzivne površine, modelovanje, usitnjavanje, mlevenje pšenice, optimizacija

<sup>1</sup> Autor doktorske disertacije potpisao je i priložio sledeće Obrasce:

5b – Izjava o autorstvu;

5v – Izjava o istovetnosti štampane i elektronske verzije i o ličnim podacima;

5g – Izjava o korišćenju.

Ove Izjave se čuvaju na fakultetu u štampanom i elektronskom obliku i ne koriče se sa tezom.

Rezime na jeziku rada:	<p>Glavni cilj istraživanja ove doktorske disertacije bio je da se definišu matematički i statistički modeli pomoću kojih će se omogućiti kontrola uticaja polaznih parametara (karakteristika usitnjanog materijala i parametara usitnjavanja) na pokazatelje efektivnosti usitnjavanja u tehnološkom postupku mlevenja pšenice. U tu svrhu primenjen je koncept matričnih jednačina za kontrolu uticaja svojstava usitnjanog materijala na efekte usitnjavanja na prolazištima krupljenja i metoda odzivne površine za kontrolu uticaja parametara usitnjavanja na efekte usitnjavanja u fazi mlevenja griza.</p> <p>Matrice usitnjavanja i njihovo svojstvo reverzibilnosti upotrebljeni su za predviđanje i kontrolu kvantitativnih efekata usitnjavanja (prinosa ukupnih izvoda i pojedinih frakcija mliva) na tri uzastopna prolazišta krupljenja. Pokazano je da se primenom matrica usitnjavanja u direktnom smeru za datu raspodelu veličine zrna polaznog uzorka pšenice može odrediti raspodela veličine čestica mliva sa prvog, drugog i trećeg krupača, a na taj način i vrednosti prinosa ukupnog izvoda i prinosa pojedinih frakcija mliva. Pored toga, pokazano je da se upotrebom matrica usitnjavanja u povratnom smeru može odrediti raspodela veličina zrna pšenice usitnjavanjem koje će se ostvariti željene, unapred definisane vrednosti prinosa ukupnih izvoda na prolazištima krupljenja. Reverzibilnost matrica usitnjavanja upotrebljena je i za kontrolu kvantitativnih (raspodela veličina čestica frakcija mliva) i kvalitativnih (sadržaj pepela) pokazatelja efektivnosti usitnjavanja istovremeno, a na prolazištu krupljenja. Pokazano je da se primenom povratnih matrica usitnjavanja mogu odrediti odgovarajuće raspodele veličine čestica frakcija zrna čijim će se usitnjavanjem dobiti frakcije mliva sa željenom raspodelom veličine čestica i sadržajem pepela. Uz to povratne matrice usitnjavanja upotrebljene su i za istovremenu kontrolu pomenutih pokazatelja efektivnosti usitnjavanja i raspodele veličine čestica u frakcijama zrna koja se usitnjavaju.</p> <p>Metodom odzivne površine ispitan je uticaj razmaka između valjaka (0,04, 0,07 i 0,1 mm), broja obrtaja valjaka (300, 400 i 500 o/min), prenosnog odnosa (1,1, 1,5 i 1,9) i specifičnog opterećenja valjaka (0,2, 0,3 i 0,4 kg/cm•min), na prinos brašna (%), sadržaj pepela u brašnu (%),sm, potrošnju energije u odnosu na masu samlevenog materijala [kJ/kg] i potrošnju energije u odnosu na masu dobijenog brašna [kJ/kg]. Primenjen je Box-Behnken eksperimentalni dizajn, urađena je provera adekvatnosti dobijenih polinomnih modela i izvršena je analiza uticaja (pojedinačnih i kombinovanih) parametara usitnjavanja na posmatrane odzive. Izvršena je optimizacija procesa sa ciljem da se definiše kombinacija parametara pri kojima se uz minimalnu potrošnju energije postiže što veći prinos brašna sa što manjim sadržajem pepela. Predložena je kombinacija ulaznih parametara: razmak između valjaka 0,05 mm, prenosni odnos 1,3, broj obrtaja brzohodnog valjka 500 o/min i specifično opterećenje valjaka 0,3 kg/cm•min. Predviđene vrednosti posmatranih odziva za predloženu kombinaciju ulaznih parametara bili su: prinos brašna 16%, sadržaj pepela u brašnu 0,38%sm, uoštak energije izražen u odnosu na masu usitnjenog materijala 37,8 kJ/kg i uoštak energije izražen u odnosu na masu dobijenog brašna 232,2 kJ/kg, a zadovoljenje je</p>
------------------------	--

	bilo 70,66%.
Datum prihvatanja teme od strane nadležnog veća:	12.07.2018.
Datum odbrane:  (Popunjavanje odgovarajuća služba)	
Članovi komisije:  (titula, ime, prezime, zvanje, institucija)	<p>Predsednik: dr Dragana Šoronja-Simović, vanredni profesor, Tehnološki fakultet, Univerzitet u Novom Sadu</p> <p>Mentor: dr Aleksandar Fišteš, redovni profesor, Tehnološki fakultet, Univerzitet u Novom Sadu</p> <p>Mentor: dr Dušan Rakić, vanredni profesor, Tehnološki fakultet, Univerzitet u Novom Sadu</p> <p>Član: dr Aleksandar Takači, redovni profesor, Tehnološki fakultet, Univerzitet u Novom Sadu</p> <p>Član: dr Milica Pojić, naučni savetnik, Naučni institut za prehrambene tehnologije, Univerzitet u Novom Sadu</p>
Napomena:	

UNIVERSITY OF NOVI SAD

FACULTY OF TECHNOLOGY

KEY WORD DOCUMENTATION<sup>2</sup>

Document type:	PhD thesis
Author:	Nemanja Bojanić
Supervisor (title, first name, last name, position, institution)	dr Aleksandar Fišteš, full professor, Faculty of Technology, University of Novi Sad dr Dušan Rakić, associate professor, Faculty of Technology, University of Novi Sad
Thesis title:	Application of reverse breakage matrix approach and response surface methodology for controlling of the grinding effects in the in the wheat flour milling process
Language of text (script):	Serbian language ( <u>latin</u> )
Physical description:	Number of: Pages <u>135</u> Chapters <u>6</u> References <u>174</u> Tables <u>22</u> Illustrations <u>37</u> Graphs <u>-</u> Appendices <u>-</u>
Scientific field:	Food engineering
Scientific subfield (scientific discipline):	Carbohydrate Food Engineering
Subject, Key words:	reverse breakage matrices, response surface methodology, modeling,

<sup>2</sup> The author of doctoral dissertation has signed the following Statements:

5ᄀ – Statement on the authority,

5B – Statement that the printed and e-version of doctoral dissertation are identical and about personal data,

5r – Statement on copyright licenses.

The paper and e-versions of Statements are held at he faculty and are not included into the printed thesis.

	grinding, wheat milling, optimization
Abstract in English language:	<p>The main goal of the research of this doctoral dissertation was to define mathematical and statistical models that will enable control of the influence of input parameters (properties of milled material and milling parameters) on indicators of milling efficiency in the technological process of wheat flour milling. For that purpose, the breakage matrix approach was used for control of the influence that milled material properties have on the effects of milling, while response surface methodology was used for control of the influence of milling parameters on the effects of the milling.</p> <p>The breakage matrix approach, both in direct and in reverse manner, has been used for the purpose of controlling the release on the first three passages of the break system in the flour milling process. It has been established that, for any particle size distribution of wheat, it is possible to predict break releases together with the distribution of the release size fractions by using the breakage matrices. Also, the reversibility of this approach is examined, and it has been confirmed that reverse breakage matrix approach can be used to identify the wheat particle size distribution that would result in desired break releases and/or the desired yields of different sized intermediate stocks under the given set of milling conditions. Also, reverse breakage matrix approach has been used for controlling the effects that milling has on the particle size distribution and composition of the comminuted material. It has been shown that the reverse matrix approach can be successfully used for defining the particle size distribution of the input material leading to the desired, predetermined particle size and compositional distribution in the output material. Moreover, it has been illustrated that it is possible to simultaneously control both, input and output particle size distribution, together with the composition of the output material.</p> <p>Response surface methodology was applied in order to evaluate effects of the roll gap (0.04–0.1 mm), differential (1.1–1.9), roll speed (300–500 rpm) and feed rate (0.2–0.4 kg/cm min) on flour yield (%), ash content (%dm and energy consumption of the milling process [kJ/kg] and to optimize following process. Experimental runs were performed according to Box-Behnken experimental design (BBD). Adequacy of the obtained polynomial models have been checked and analysis of the significance of input factors and their interactions influence on the observed responses were analyzed. Optimization of the milling process is conducted in order to define combination of the milling parameters that will provide maximum flour yield with low ash content alongside with minimum energy consumption. Obtained set of parameters was as follows: roll gap 0.05 mm, differential 1.3, roll speed 500 rpm and feed rate 0.3 kg/cm min. According to predicted values for the responses, at aforementioned milling conditions expected flour yield was 16%, while other responsive variables were: ash content 0.38%, energy consumption in relation to milled material 37.8 kJ/kg and energy consumption in relation to obtained flour 232.2 kJ/kg, with desirability of the proposed solutions of 70.66%.</p>

Accepted on Scientific Board on:	12.07.2018.
Defended: (Filled by the faculty service)	
Thesis Defend Board: (title, first name, last name, position, institution)	<p>President: dr Dragana Šoronja-Simović, associate professor, Faculty of Technology, University of Novi Sad</p> <p>Mentor: dr Aleksandar Fišteš, full professor, Faculty of Technology, University of Novi Sad</p> <p>Mentor: dr Dušan Rakić, associate professor, Faculty of Technology, University of Novi Sad</p> <p>Member: dr Aleksandar Takači, full professor, Faculty of Technology, University of Novi Sad</p> <p>Member: dr Milica Pojić, principal research fellow, Institute of Food Technology, University of Novi Sad</p>
Note:	

1.0 UVOD .....	1
2.0 TEORIJSKI DEO .....	3
2.1 OSNOVI TEORIJE USITNJAVANJA ČVRSTIH TELA.....	3
2.1.1 Zakoni usitnjavanja .....	4
2.1.2 Strukturno-mehanička svojstva materijala .....	6
2.1.3 Uređaji za usitnjavanje i priroda sila deformacije .....	6
2.1.4 Efektivnost usitnjavanja .....	8
2.2 SVOJSTVA PŠENIČNOG ZRNA KAO SIROVINE ZA PROIZVODNJU BRAŠNA.....	9
2.2.1 Osnovne morfološke karakteristike, atomska građa i hemijski sastav zrna.....	9
2.2.2 Fizička svojstva zrna i zrnene mase .....	12
2.2.3 Strukturno-mehanička svojstva pšeničnog zrna.....	13
2.3 OSNOVNI ZADACI TEHNOLOŠKOG POSTUPKA MLEVENJA PŠENICE.....	15
2.3.1 Usitnjavanje pšeničnog zrna mlinskim valjcima .....	15
2.3.2 Uticaj parametara usitnjavanja na efektivnost mlevenja mlinskim valjcima.....	16
2.3.3 Kratak prikaz tehnološkog postupka mlevenja pšenice .....	21
2.3.4 Pokazatelji efektivnosti tehnološkog postupka mlevenja pšenice.....	23
2.4 PRIMENA MATEMATIČKIH MODELA U KONTROLI POSTUPKA USITNJAVANJA.....	30
2.4.1 Teorijski principi primene matičnih jednačina za predviđanje efekata usitnjavanja.....	30
2.4.2 Primena metode odzivne površine za analizu postupka mlevenja .....	45
3.0 EKSPERIMENTALNI DEO.....	51
3.1 CILJ RADA.....	51
3.2 MESTO RADA .....	51
3.3 ORGANIZACIJA EKSPERIMENTALNOG RADA .....	51
3.4 MATERIJAL ZA ISPITIVANJE.....	52
3.5 TEHNIKA.....	52
3.5.1 Laboratorijska sita .....	52
3.5.2 Laboratorijska valjna stolica – Variostühl, model C Ex 2 (Miag, Braunschweig, Germany) .	53
3.5.3 Ostali pribor.....	55
3.6 METODE RADA .....	56
3.6.1 Analize polaznih uzoraka .....	56
3.6.2 Priprema uzoraka za mlevenje .....	58
3.6.3 Usitnjavanje uzoraka .....	59



3.6.4 Efekti usitnjavanja .....	62
3.6.5 Postavka matičnih jednačina .....	64
3.6.6 Eksperimentalni plan i statistička obrada podataka .....	66
4.0 REZULTATI I DISKUSIJA .....	69
4.1 PRVA FAZA.....	69
4.1.1 Prva A faza .....	69
4.1.2 Prva B faza .....	83
4.2 DRUGA FAZA.....	103
4.2.1 Uticaj parametara usitnjavanja na prinos brašna .....	104
4.2.2 Uticaj parametara usitnjavanja na sadržaj pepela u brašnu .....	108
4.2.3 Uticaj parametara usitnjavanja na potrošnju energije izražene u odnosu na masu usitnjenog materijala.....	110
4.2.4 Uticaj parametara usitnjavanja na potrošnju energije izražene u odnosu na masu dobijenog brašna .....	113
4.2.5 Optimizacija postupka usitnjavanja pšeničnog griza primenom metode odzivne površi ..	116
4.2.6 Metoda odzivne površi - zaključna razmatranja .....	120
5.0 ZAKLJUČCI.....	121
6.0 LITERATURA.....	125

## 1.0 UVOD

Osnovni ciljevi tehnološkog postupka mlevenja pšenice jesu redukcija krupnoće pšeničnog zrna uz postizanje odgovarajuće granulacije, odnosno stepena usitnjenosti mliva i istovremena i što bolja separacija osnovnih anatomskih delova zrna, preciznije – odvajanje skrobnog endosperma od omotača i klice u što čistijem obliku. Da bi se ostvarili ovi ciljevi, usitnjavanje pšenice treba da bude što selektivnije, tako da se endosperm ne usitnjava istovremeno i u istom stepenu kao ostali anatomski delovi.

Zahtevana selektivnost usitnjavanja postiže se sukcesivnim operacijama mlevenja i razvrstavanja materijala na prolazištima mlevenja, gde se kao uređaj za mlevenje koriste mlinski valjci, a za razvrstavanje materijala planska sita. U okviru tehnološkog postupka mlevenja pšenice razlikuju se dve osnovne faze: faza krupljenja pšenice i faza mlevenja griza i oseva. Pomenute faze obuhvataju veći broj prolazišta mlevenja, među kojima se razlikuju prolazišta prvog i drugog kvaliteta.

Od efektivnosti usitnjavanja na pomenutim prolazištima zavise kvalitet finalnih proizvoda, racionalnost i ekonomičnost celokupnog postupka proizvodnje. Efektivnost mlevenja ocenjuje se na osnovu informacija koje pružaju pokazatelji efektivnosti usitnjavanja, a koji se mogu podeliti u tri grupe na: kvantitativne (stepen usitnjavanja mliva, raspodela veličina čestica mliva, prinos ukupnog izvoda, prinos brašna i sl.), kvalitativne (sadržaj mineralnih materija, odnosno sadržaj pepela, sadržaj proteina i sl.) i energetske (specifični utrošak energije po jedinici mase brašna) pokazatelje efektivnosti usitnjavanja.

Parametri koji utiču na efekte usitnjavanja mlinskim valjcima su dvojaki i potiču ili od svojstava usitnjavanog materijala (fizičko-hemijska i strukturno-mehanička svojstva) ili od parametara usitnjavanja (tehnoloških, kinematičkih i geometrijskih). Upravo se kontrolom uticaja pomenutih parametara na efekte usitnjavanja na pojedinačnim prolazištima upravlja celokupnim tehnološkim postupkom mlevenja pšenice.

Stoga će se u ovoj disertaciji ispitati mogućnosti primene pogodnih matematičkih i statističkih metoda za kontrolu efekata usitnjavanja u tehnološkom postupku mlevenja pšenice. Istraživanje će biti podeljeno u dve faze, a spram parametara koji će se kontrolisati i metoda koje će se za to primeniti.

Konkretno, u prvoj fazi istraživanja koncept matričnih jednačina biće primenjen u direktnom i reverzibilnom smeru na pojedinačnim i sukcesivnim prolazištima krupljenja za kontrolu uticaja koji karakteristike usitnjavanog materijala ispoljavaju na kvantitativne (prinos pojedinih frakcija, prinos ukupnog izvoda, prinos brašna) i kvalitativne (sadržaj pepela) pokazatelje efekata usitnjavanja. U direktnom smeru, matrice usitnjavanja primeniće se za predviđanje pomenutih kvantitativnih i kvalitativnih pokazatelja efektivnosti usitnjavanja, dok će se u reverzibilnom smeru pomoću matrica definisati karakteristike polaznog materijala čijim je usitnjavanjem, pri datim uslovima usitnjavanja, moguće ostvariti željene, unapred definisane, kvantitativne i kvalitativne efekte usitnjavanja.

Druga faza istraživanja biće usmerena na kontrolu uticaja koji parametri usitnjavanja imaju na efekte usitnjavanja. U tu svrhu upotrebiće se statistička metoda odzivne površine pomoću koje će se ispitati uticaj tehnoloških (razmak između valjaka i specifično opterećenje valjaka) i kinematičkih (obimna brzina valjaka i prenosni odnos) parametara usitnjavanja na kvantitativne (prinos brašna), kvalitativne (sadržaj pepela) i energetske (ukupan utrošak energije) pokazatelje efektivnosti usitnjavanja u fazi mlevenja griza. Odrediće se značajnost uticaja svakog od analiziranih parametara usitnjavanja na posmatrane odzive i izvršiće se optimizacija postupka usitnjavanja sa ciljem povećanja prinosa brašna uz smanjenje sadržaja pepela i ukupnih energetske troškova.

Definisanjem predloženih modela omogućiće se kontrola polaznih parametara (karakteristika usitnjavanog materijala i parametara usitnjavanja) koji utiču na rezultate mlevenja sa ciljem da se ostvare željeni, unapred definisani pokazatelji efektivnosti usitnjavanja. Na taj način će se omogućiti sveobuhvatnija racionalizacija, automatizacija i kontrola celokupnog tehnološkog postupka mlevenja pšenice, što je krajnji cilj ove disertacije. Dodatno, kako koncept reverzibilnosti matrica usitnjavanja i metoda odzivne površine nisu ograničene samo na modelovanje postupka usitnjavanja u tehnološkom postupku mlevenja pšenice, rezultati ove disertacije moći će da se primene i za modelovanje operacija usitnjavanja zastupljenih u drugim industrijskim granama.

## 2.0 TEORIJSKI DEO

### 2.1 OSNOVI TEORIJE USITNJAVANJA ČVRSTIH TELA

Veličina čestica čvrstih materijala koji se koriste u industriji može da varira u širokom opsegu, a čest je slučaj da je za njihovu dalju upotrebu neophodno smanjiti njihovu krupnoću. Tehnološka operacija kojom se redukuje veličina čestica čvrstog materijala do manjih, grubih ili finijih čestica naziva se usitnjavanje [1]. Ova operacija predstavlja veoma značajnu i frekventno zastupljenu operaciju u mnogim granama industrije.

U određenim situacijama smanjenje veličine čestica može da se odvija nenamerno i da predstavlja nepoželjni sporedni efekat nekih drugih operacija u toku tehnološkog procesa (transport, mešanje i dr.) [2]. Ipak, kada je reč o kontrolisanoj tehnološkoj operaciji usitnjavanja, njen cilj je određen daljom upotrebom usitnjenog materijala (mliva). Pojedini tehnološki procesi zahtevaju prostu redukciju polaznog materijala, odnosno postizanje odgovarajuće raspodele veličine čestica. Razlozi za to mogu da budu različiti. Povećanje specifične površine čestica kako bi se ubrzala hemijska reakcija ili skratilo vreme sušenja; postizanje željene strukture finalnog proizvoda ili povećanje efektivnosti ekstrakcije pojedinih komponenata iz čestica samo su neki od razloga zbog kojih bi cilj operacije usitnjavanja bila prosta redukcija veličine čestica. Međutim, zadatak koji se postavlja pred operaciju usitnjavanja može da bude i složeniji. Nekada je pored smanjenja krupnoće polaznog materijala neophodno iz njega izdvojiti specifične čestice. Takve čestice razlikuju se od ostalih po svom obliku, hemijskom sastavu ili nekoj drugoj osobini što ih čini pogodnim za dalju obradu ili izdvajanje u vidu finalnog proizvoda. Tada operacija usitnjavanja ima selektivni karakter i neophodno joj je pridružiti i operaciju kojom će se izvršiti separacija ciljanih čestica.

Imajući u vidu navedene varijacije po pitanju cilja usitnjavanja, kao i heterogenost materijala koji se obrađuju u prehrambenim, hemijskim, farmaceutskim i drugim granama industrije, jasno je da postoji potreba za različitim tipovima uređaja za usitnjavanje. Njihove razlike mogu da potiču od konstrukcije, oblika radnih elemenata ili sila deformacije koje koriste da bi se postigli željeni efekti usitnjavanja. Takođe, različitim uređajima postiže se i drugačiji stepen usitnjenosti mliva, pa se usitnjavanje spram toga može okarakterisati kao grubo, srednje ili fino. [3,4]. Ipak, ovakva karakterizacija je relativna i sprovodi se u odnosu na usitnjavani materijal ili u odnosu na finalni proizvod i njegovu namenu.

Da bi se bolje razumela operacija usitnjavanja, neophodno je sagledati šta se dešava sa polaznim materijalom u mlevnom prostoru. Naime, čestice usitnjavanog materijala izložene su mehaničkim silama kojima radni elementi uređaja za usitnjavanje deluju na njih. Usled dejstva ovih sila unutar čestica usitnjavanog materijala dolazi do naprezanja, a kada te sile pređu određen – kritični nivo – specifičan za svaki materijal i određen njegovim strukturno-mehaničkim osobinama, dolazi do usitnjavanja čvrstih tela i formiranja veće ukupne površine [4,5]. Treba napomenuti da iako je cilj u postupku usitnjavanja usmeriti uloženu energiju na usitnjavanje, odnosno na izazivanje plastčnih i elastičnih deformacija, te raskidanja

molekulskog privlačenja unutar materijala i dobijanje veće površine čestica, deo energije uvek se gubi (ne troši se na povećanje površine čestica) ili se transformiše u neki drugi vid energije. To su najčešće toplotna energija, energija zvuka, vibracije, energija koja se troši na naelektrisanje čestica usitnjavanog materijala ili na savladavanje otpora uređaja za usitnjavanje [6].

Iz navedenog se može zaključiti da su efekti, kao i sam tok postupka usitnjavanja, uslovljeni sa jedne strane svojstvom materijala koji se usitnjava, odnosno njegovim fizičkim i strukturno-mehaničkim osobinama, a sa druge karakterom i odnosom sila koje deluju na čestice u mlevnom prostoru [7,8].

### 2.1.1 Zakoni usitnjavanja

Osnovne teorije usitnjavanja postavljene su još u drugoj polovini XIX veka. Hipoteze koje su postavili Rittinger [9], Kick [10] i Kirpičev [11], a kasnije i Bond, zasnivaju se na istoj diferencijalnoj jednačini:

$$\frac{dE}{dL} = K \cdot L^n, \quad (2.1)$$

u kojoj  $dE$  predstavlja promenu energije potrebnu da se izazove promena  $dL$  dimenzije polazne čestice  $L$ . Ostali članovi jednačine su konstanta  $K$ , dok  $n$  zavisi od dimenzije čestice i primenjene hipoteze [5,6].

Rittingerova hipoteza naziva se još i površinska hipoteza. Ona pretpostavlja da je rad utrošen na usitnjavanje čestica jednak površini usitnjenog materijala, odnosno porastu površinske energije koji je usitnjavanjem ostvaren. Član  $n$  u diferencijalnoj jednačini (2.1) prema Rittingerovoj teoriji ima vrednost  $n = -2$ .

Sa druge strane, prema Kicku i Kirpičevu rad ostvaren tokom usitnjavanja jednak je odnosu zapremine čestica pre i nakon usitnjavanja. Dvojica naučnika su ovu hipotezu, koja se naziva zapreminska hipoteza, postavili nezavisno jedan od drugog. Kako je potrebni utrošak energije u ovom slučaju direktno proporcionalan odnosu  $dL/L$  vrednost preostalog člana  $n$  biće jednaka  $n = -1$ .

Treću hipotezu definisao je Bond. On je telo koje se usitnjava predstavio kockom sa stranicom dimenzije  $x$ , a rad potreban za usitnjavanje takvog tela jednak je zapremini tog tela. Međutim, kada nastane prva pukotina i telo počne da se drobi, prema ovoj hipotezi energija postaje srazmerna površini nastalih čestica. Iz ovoga sledi finalna pretpostavka da je za tela nepravilnog oblika utrošena energija negde između zapremine usitnjavanog tela i površine čestica dobijenih usitnjavanjem te da  $n$  u ovom slučaju ima vrednost  $n = -1,5$ , odnosno  $n = -3/2$ .

Kada se u početnu diferencijalnu jednačinu (2.1) ubace vrednosti konstante  $n$  za sva tri slučaja, dobijaju se sledeće relacije, koje predstavljaju pomenuta tri zakona (Rittingerov, Kick-Kirpičev i Bondov, respektivno):

$$n = -2 \quad E = K_R \cdot \left( \frac{1}{L_2} - \frac{1}{L_1} \right), \quad (2.2)$$

$$n = -1 \quad E = K_K \cdot \ln \left( \frac{L_1}{L_2} \right), \quad (2.3)$$

$$n = -1,5 \quad E = 2K_B \cdot \left( \frac{1}{\sqrt{L_{2(80)}}} - \frac{1}{\sqrt{L_{1(80)}}} \right). \quad (2.4)$$

Posmatranjem prethodno navedenih jednačina, može se zaključiti da utrošak energije po jedinici mase usitnjavanog materijala ( $E$ ) u sva tri slučaja zavisi od dimenzija (prečnika) čestica polaznog ( $L_1$ ) i usitnjenog ( $L_2$ ) materijala, kao i od odgovarajućeg eksperimentalnog koeficijenta  $K$ .

Vrednosti  $L_{1(80)}$  i  $L_{2(80)}$  u Bondovoj jednačini predstavljaju dimenziju od koje je 80% čestica usitnjavanog ( $L_{1(80)}$ ), odnosno usitnjenog materijala ( $L_{2(80)}$ ) manje. Bondova jednačina često se prikazuje i u drugom obliku, kada je u nju uključen i indeks rada  $W_i$ . Ovaj indeks predstavlja energiju po jedinici mase usitnjavanog materijala, potrebnu da bi se čestice polaznog materijala usitnile do čestice dimenzije 100  $\mu\text{m}$ . Tada se Bondov zakon iskazuje sledećom relacijom:

$$E = 10W_i \cdot \left( \frac{1}{\sqrt{L_{2(80)}}} - \frac{1}{\sqrt{L_{1(80)}}} \right). \quad (2.5)$$

Predstavljene relacije za izračunavanje rada potrebnog za operaciju usitnjavanja pokazale su različitu preciznost u zavisnosti od vrste usitnjavanja koju opisuju. Tako su se formule izvedene iz površinske hipoteze pokazale pogodnije za predviđanje utrošenog rada prilikom finog usitnjavanja, dok se zapreminska hipoteza pokazala preciznijom pri grubom usitnjavanju [5].

Različita podobnost navedenih jednačina za različite slučajeve usitnjavanja može se objasniti preko jednačine koju je postavio Rebinder [12]:

$$E = E_Y + E_S, \quad (2.6)$$

prema kojoj je ukupna energija potrebna za usitnjavanje ( $E$ ) jednaka zbiru energije koja se utroši na plastične i elastične deformacije ( $E_Y$ ) i energije koja se utroši na povećanje površine čestica ( $E_S$ ). Pri grubom usitnjavanju, drobe se velike čestice polaznog materijala, a tada je priraštaj površine relativno mali. Iz toga sledi da će član koji se odnosi na povećanje površine biti zanemarljiv, te da će utrošak energije za drobljenje približno biti jednak prvom članu, odnosno srazmeran zapremini čvrstog tela koje se usitnjava. Upravo zato teorija Kick-

Kirpičeva pokazuje veću preciznost u slučajevima grubog usitnjavanja. Sa druge strane, u slučaju finog usitnjavanja drugi član jednačine (2.6) ima znatno veću vrednost od prvog, jer je priraštaj površine veći. Zato je utrošak energije u slučaju finog usitnjavanja približno srazmeran povećanju površine čestica i zato je Rittingerova hipoteza preciznija u opisivanju ovakvih postupaka.

### 2.1.2 Strukturno-mehanička svojstva materijala

Ponašanje čvrstih materijala prilikom usitnjavanja, odnosno pod dejstvom neke spoljašnje sile, uslovljeno je njegovom strukturom, fizičkim stanjem i reološkim osobinama [13]. Kada su izložene statičkim i dinamičkim opterećenjima čestice ispoljavaju mehanička svojstva, koja se zbog uske povezanosti sa strukturom nazivaju i strukturno-mehanička svojstva. Strukturno-mehanička svojstva određuju kako će čestice reagovati na sile deformacije kojima su izložene – da li će se i u kom stepenu usitniti, da li će biti postignut željeni kvalitet finalnog proizvoda, kao i koliko će se energije u takvom postupku usitnjavanja utrošiti. U strukturno-mehanička svojstva materijala ubrajaju se tvrdoća, čvrstoća, žilavost, elastičnost, plastičnost i relaksaciona svojstva, koja će se u okviru disertacije detaljnije obraditi, na primeru pšeničnog zrna.

Strukturno-mehanička svojstva materijala određuju na koje će deformacije materijal da bude otporan, a kojim deformacijama će da bude podložniji [14]. Tako će se tela sa naglašenim elastičnim svojstvima lakše usitniti kada su izložena silama sabijanja, dok će se vlaknasti materijali i materijali sa velikom čvrstoćom najpre usitniti pod dejstvom smicajnih sila. Imajući u vidu pomenute razlike koje postoje među materijalima usled različitih strukturno-mehaničkih svojstava, jasno je da je neophodno pažljivo razmatranje kako bi se odabrao najpogodniji uređaj za usitnjavanje. Stoga će tema narednog poglavlja biti uređaji za usitnjavanje, princip njihovog delovanja na čestice u mlevnom prostoru i njihova osnovna klasifikacija.

### 2.1.3 Uređaji za usitnjavanje i priroda sila deformacije

Kao posledica razlika u strukturno-mehaničkim osobinama materijala zastupljenih u industriji, kao i cilja operacije usitnjavanja vremenom su razvijeni različiti tipovi uređaja za usitnjavanje. Razlike među ovim uređajima mogu da potiču od njihove konstrukcije, radnih elemenata, stepena do kojeg usitnjavaju materijal, vremena zadržavanja materijala u mlevnom prostoru ili od njihovog režima rada.

Konstrukcija uređaja za usitnjavanje i karakteristike radnih elemenata uređaja određuju način na koji radni elementi deluju na usitnjavani materijal, odnosno kojim silama deformacije su izložene čestice u mlevnom prostoru. Na osnovu sila deformacije koje deluju na čestice Haque [4] je izvršio klasifikaciju uređaja za usitnjavanje na:

- uređaje sa dominantnom silom sabijanja (mlinski valjci, mlinski kamen, čeljusna drobilica, kupasta drobilica, konični mlin, disk mlin),
- uređaje sa dominantnom silom udara (čekičar, dezintegrator, vibracioni mlin, kuglični mlin),
- uređaje sa dominantnom silom smicanja (mlinski valjci, mlinski kamen, konični mlin, disk mlin),
- uređaje sa dominantnom silom trenja (mlinski kamen, kupasta drobilica, konični mlin, disk mlin, koloidni mlin, kuglični mlin),
- uređaje sa dominantnom deformacijom rezanja (žlebljeni valjci, kupasta drobilica, disk mlin (žlebljena površina), mlin sa noževima).

Ovakva podela uređaja za usitnjavanje ne isključuje mogućnost da je pored jedne od navedenih sila u mlevnom prostoru zastupljena i neka druga sila deformacije. Usitnjavanje najčešće nastaje kao rezultat kombinovanog uticaja jedne dominantne sile i drugih sila koje deluju na usitnjavani materijal [15].

Cilj usitnjavanja može da diktira željeni stepen usitjenosti mliva, pa je jedna od podela uređaja za usitnjavanje izvršena prema postignutom stepenu usitjenosti. Prema ovome pokazatelju usitnjavanje se najčešće definiše kao:

- grubo usitnjavanje,
- srednje usitnjavanje,
- fino usitnjavanje i
- superfino usitnjavanje.

Ipak, nije uvek moguće jasno definisati granicu između različitih stepeni usitjenosti mliva, prevashodno jer ova procena zavisi od granulacije polaznog materijala. Stoga klasifikacija uređaja za usitnjavanje prema stepenu usitjenosti mliva ima relativan karakter i može da uključuje dodatne opisne ocene stepena usitjenosti mliva. Pored toga, mlivo predstavlja heterogen materijal posmatrano sa aspekta krupnoće čestica, što je još jedna od poteškoća prilikom ovakve klasifikacije uređaja za usitnjavanje. Ipak, uređaji mogu da budu konstruisani tako da kontrolišu stepen usitjenosti putem gornje granice krupnoće čestica, ili tako da količinu veoma sitnih čestica minimalizuju, ali ne i u potpunosti izbegnu njihovo stvaranje [16].

Prema režimu rada uređaji za usitnjavanje mogu da se podele na uređaje „otvorenog“ i uređaje „zatvorenog“ tipa. Uređaji otvorenog tipa podrazumevaju jednostepeni prolazak materijala kroz mlevni prostor, bez mogućnosti da se materijal ponovo vrati na usitnjavanje. Uređaji zatvorenog tipa u radu kombinuju uređaje za usitnjavanje i separatore, i tako pružaju mogućnost dodatnog usitnjavanja nedovoljno usitjenih čestica [16].

Uređaje za usitnjavanje možemo podeliti i na kontinualne ili diskontinualne u zavisnosti od postupka u kojem se realizuje operacija usitnjavanja, a dodatna klasifikacija je prema vremenu zadržavanja čestica u mlevnom prostoru. Postoje uređaji za usitnjavanje kod kojih čestica jednokratno prolazi i ima kontakt sa radnim elementima uređaja za usitnjavanje, uz



relativno kratko vreme zadržavanja. Sa druge strane, postoje uređaji sa dužim vremenom zadržavanja čestica, pri čemu su čestice u više navrata izložene silama deformacije od strane radnih elemenata uređaja [17,18].

#### 2.1.4 Efektivnost usitnjavanja

Ocena efektivnosti operacije usitnjavanja uslovljena je ciljem postupka usitnjavanja. U zavisnosti od toga, koriste se različite vrste pokazatelja efektivnosti.

Kada je osnovni cilj usitnjavanja prosta redukcija veličine čestica polaznog materijala, najčešće se koriste kvantitativni pokazatelji. Kao osnovni kvantitativni pokazatelj efektivnosti usitnjavanja koristi se stepen usitnjenosti čestica. Definisana je odnosom površine čestica nakon i pre usitnjavanja ili odnosom prosečne veličine čestica pre i nakon usitnjavanja. U praksi se, kao indirektni kvantitativni pokazatelj efektivnosti usitnjavanja, a u cilju njenog lakšeg i bržeg određivanja, češće koristi granulacioni sastav mliva određen analizom sejanja [19]. Analizom sejanja dobijaju se informacije o masi čestica nekog materijala koje se nalaze u određenom opsegu veličina, odnosno dobija se masena distribucija čestica. Analiza sejanja je jedna od najstarijih i najzastupljenijih metoda za određivanje stepena usitnjenosti. Vremenom su razvijene nove instrumentalne metode kao što su: metoda analize laserske svetlosti, metoda dinamičkog rasipanja laserske svetlosti ili metoda analize slike. Osnovna razlika između navedenih metoda i analize sejanja je što se kod njih rezultati izražavaju na zapreminskoj, površinskoj ili numeričkoj bazi. Dakle, one govore koji procenat zapremine ili površine čestica zauzimaju čestice u određenom intervalu veličina ili o broju čestica od ukupnog broja čestica koje se nalaze u tom intervalu. Zbog razlika u prezentovanju rezultata određivanja veličine čestica između pomenutih metoda, neophodno je biti veoma oprezan u tumačenju, poređenju i prevođenju rezultata raspodele veličine čestica dobijenih različitim metodama.

Kao što je pomenuto, nekada je pored redukcije veličine čestica neophodno obezbediti i dobru separaciju pojedinih čestica ili anatomskih delova čestica. Tada se pored kvantitativnih pokazatelja usitnjavanja upotrebljavaju i kvalitativni pokazatelji efektivnosti usitnjavanja. Oni na osnovu sadržaja određenih hemijskih komponenata u frakcijama mliva različite krupnoće ukazuju na ostvareni stepen razdvajanja i na taj način daju kvalitativnu ocenu efikasnosti usitnjavanja.

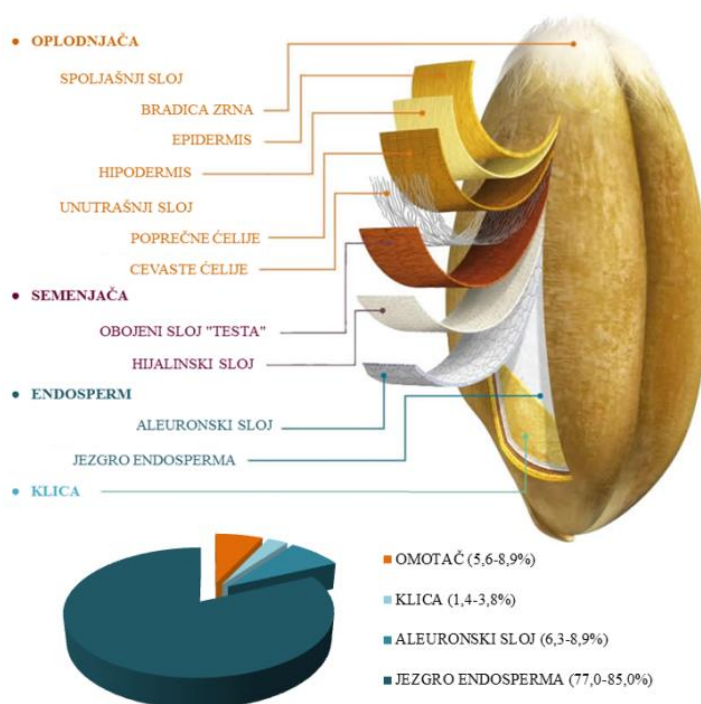
Kvantitativnim i kvalitativnim pokazateljima efektivnosti usitnjavanja često se pridružuju i energetske pokazatelji. Energetske pokazatelji se smatraju pomoćnim pokazateljima, a govore o količini energije potrebnoj da se određena masa materijala usitni ili o količini energije potrebnoj da se dobije određena masa finalnog proizvoda.

## 2.2 SVOJSTVA PŠENIČNOG ZRNA KAO SIROVINE ZA PROIZVODNJU BRAŠNA

### 2.2.1 Osnovne morfološke karakteristike, anatomska građa i hemijski sastav zrna

Oblik i veličina pšeničnog (*Triticum aestivum*) zrna su specifični za sortu pšenice, a dodatno su uslovljeni klimatskim prilikama tokom sazrevanja, primenjenom agrotehnikom ili karakteristikama zemljišta na kojem je pšenica odgajana [20]. Varijacije među zrnima pšenice mogu da nastanu i kao posledica položaja zrna u klasu, odnosno redosleda oplodnje zrna unutar istog klasa [21]. Ipak, uprkos mnoštvu faktora koji utiču na oblik i veličinu pšeničnog zrna i čine da postoje varijacije među njima, pšenično zrno se može definisati kao zrno izduženo elipsoidnog oblika. Zrno je najčešće dugačko od 5 do 7 mm, sa širinom od 2,5 do 4 mm, i debljinom do 3,8 mm [22].

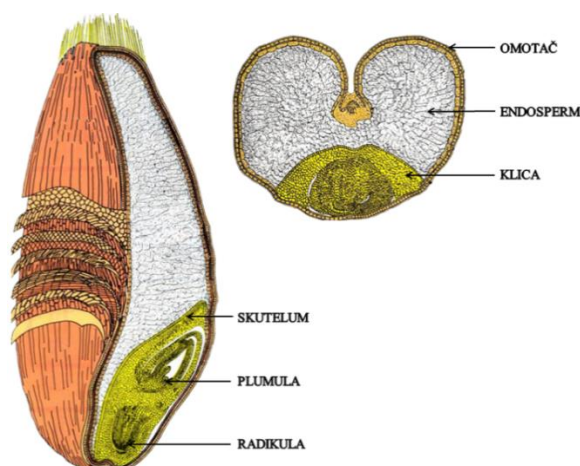
Leđna strana pšeničnog zrna je zaobljena, dok se na prednjoj (trbušnoj) strani nalazi uzdužna brazda [23]. Zrno je izdiferencirano na tri osnovna anatomski dela: klicu, omotač i endosperm. Anatomski delovi zrna međusobno se razlikuju po hemijskom sastavu, građi, strukturno-mehaničkim osobinama, funkciji i udelu u zrnu (Slika 2.1).



**Slika 2.1.** Anatomski građa pšeničnog zrna i procentualni udeo osnovnih anatomskih delova zrna [24]

Klica je deo zrna iz kojeg se razvija nova biljka i sadrži u sebi velike količine nutritivno vrednih komponenta [25]. Nalazi se sa leđne strane pšeničnog zrna, nasuprot bradici i sastoji se od dva dela: skuteluma i embrione ose (Slika 2.2). Skutelum je deo klice prema endospermu i njegova uloga je snabdevanje klice hranljivim materijama koje su neophodne za


razvoj biljke. Embriону osu sačinjavaju dva dela, a to su klicino stabaoce i listići (plumula) i klicin korenčić (radikula) [20].



**Slika 2.2.** Uzdužni i poprečni presek zrna pšenice sa označenim osnovnim anatomskim delovima i osnovnim delovima klice

Pšenična klica predstavlja bogat izvor vitamina E i vitamina B, prehrambenih vlakana, šećera i mineralnih materija, a u odnosu na ostale anatomske delove zrna sadrži znatno veće količine proteina i masti [24,26,27] (Tabela 2.1). Sadrži značajne količine bioaktivnih komponenti [28] kao što su tokoferoli, fitosteroli, karotenoidi, tiamin, riboflavin i pokazuje i značajnu anti-oksidativnu aktivnost [29]. Ulje iz pšenične klice bogato je trigliceridima (57% ukupnih masti), a od masnih kiselina najzastupljenije su od zasićenih palmitinska i stearinska, a od nezasićenih oleinska i linolna [30].

**Tabela 2.1.** Hemijski sastav osnovnih anatomskih delova pšeničnog zrna [24]

		ANATOMSKI DEO ZRNA				
		OMOTAČ		ENDOSPERM		KLICA
		OPLODNJAČA	SEMENJAČA	ALEURONSKI SLOJ	JEZGRO ENDOSPERMA	
		LJUSKA				
SADRŽAJ HEMIJSKE KOMPONENTE (%) <sub>sm</sub>	PROTEINI	5-8	12-20	16-20	12-15	24-42
	SKROB	-	-	-	75-80	-
	CELULOZA	20-22	1-1,5	5-7	0,1-0,2	2-2,5
	PENTOZANI	25-30	14-36	6-8	2-3	9-11
	MASTI	1-2	0-0,2	10-15	0,7-1	13-24
	PEPEO	3,5-24,5	7-20	14,5-17	0,25-0,55	5,5-6,5

Zbog visokog sadržaja masti klica je veoma nestabilna. Samim tim, ukoliko se veća količina delova klice nađe u pšeničnom brašnu, povećava se mogućnost kvarenja brašna [31]. Stoga se u postupku prerade pšenice klica izdvaja kao sporedni proizvod, a zahvaljujući plastičnim osobinama klice koje poseduje zbog visokog sadržaj masti to izdvajanje je znatno olakšano [32]. Udeo klice u zrnu pšenice je oko 2 – 3% [21].

Prema udelu, drugi najzastupljeniji anatomske deo pšeničnog zrna predstavlja omotač. Omotač obavija zrno po celoj površini i predstavlja svojevrsnu mehaničku zaštitu endosperma i klice od spoljašnjih uticaja. Ovu ulogu omotač uspešno obavlja zahvaljujući visokom sadržaju celuloze i pentozana (vlaknastih komponenti) [33]. Omotač pšeničnog zrna čine spoljašnji deo – oplodnjača i unutrašnji deo koji se naziva semenjača (Slika 2.1). Unutar oplodnjače razlikuje se spoljašnji sloj koji čine ćelije epidermisa prekrivene tankim slojem voska. Gornji sloj ovih ćelija se transformiše u dlačice koje formiraju bradicu zrna. Ispod epidermisa nalazi se sloj hipodermisa, a potom sledi unutrašnji sloj oplodnjače, sačinjen od slojeva poprečnih i cevastih ćelija [22,23]. Semenjaču čine dva sloja. Sa spoljne strane oslonjen o oplodnjaču nalazi se obojeni sloj “testa“, ispod kojeg se nalazi hijalinski sloj. Hijalinski omotač obavija zrno po celoj površini, izuzimajući klicu, a svojom unutrašnjom stranom srastao je sa aleuronskim slojem [34]. Udeo omotača u zrnu je od 5,6 – 8,9% od čega od 4-6% čini oplodnjača, a oko 2% semenjača. Kada se omotaču pridoda i aleuronski sloj, ukupna debljina omotača iznosi od 50 do 80  $\mu\text{m}$ , a omotač tada čini oko 17% pšeničnog zrna [23,35].

U unutrašnjosti zrna nalazi se endosperm. Endosperm čini od 74,9 do 86,5% pšeničnog zrna i iz njega se dobija finalni proizvod mlevenja – brašno [35]. Stoga sa mlinskog aspekta endosperm predstavlja najvažniji anatomske deo pšeničnog zrna. Endosperm je sačinjen od dva dela. Spoljni deo čini red prizmatičnih ćelija i naziva se aleuronski sloj. Ćelije u ovom sloju su žive ćelije, bogate proteinima, mastima i mineralnim materijama (Tabela 2.1). Aleuronski sloj obavija pšenično zrno u celini, izuzev područja u kojem se nalazi klica [36]. Po svojim tehnološkim osobinama aleuronski sloj je sličniji omotaču pšeničnog zrna te se u postupku prerade pšenice izdvaja zajedno sa omotačem u sporedne proizvode mlevenja [37]. U unutrašnjosti zrna nalazi se jezgro endosperma. Formiraju ga parenhimske ćelije tankih zidova, sačinjene od skrobnih zrnaca uklopljenih u proteinsku matricu. Veličina i oblik ćelija varira spram njihovog položaja i najčešće su periferne ćelije (ćelije u sub-aleuronskom sloju) sitnije, dok se u unutrašnjem endospermu nalaze krupnije ćelije, prizmatičnog ili okruglasto-poligonalnog oblika [20,23]. Skrobne granule jezgra endosperma se na osnovu veličine i oblika dele na dva tipa – tip A i tip B. Tip A su granule ovalnog ili oblika diska sa veličinom od 30 do 50  $\mu\text{m}$ . One čine više od 70% ukupne težine skroba unutar pšeničnog zrna. Granule tip B su sferičnog ili poligonalnog oblika i u dijametru su dužine od 1 do 10  $\mu\text{m}$ . Prema udelu čine više od 90% skrobnih granula, ali manje od 30% ukupnog skroba [38]. Proteinski matriks izgrađen je od dve vrste proteina. Prvi ispunjavaju prostor između skrobnih granula i nazivaju se uklješteni proteini. Druga vrsta su priljubljeni proteini i oni obavijaju skrobna zrna u tankom sloju [24]. Pored proteina, skrobne granule obavija i sloj lipida i lipoproteina (Slika 2.3).



**Slika 2.3.** Šematski prikaz skrobne granule sa okruženjem (modifikovano iz [36])

Strukturno-mehaničke osobine pšeničnog zrna pre svega zavise od prirode veze između proteina i skroba kao osnovnih komponenti endosperma [39].

### 2.2.2 Fizička svojstva zrna i zrnene mase

U fizička svojstva pšeničnog zrna spadaju: veličina i oblik pojedinačnih zrna, ujednačenost veličine zrna u okviru zrnene mase, staklavost i brašnavost, masa 1000 zrna, zapreminska masa i mnoge druge. Krupnoća, oblik i raspodela veličina zrna izdvajaju se kao fizičke karakteristike koje značajno utiču na postavljanje parametara u operacijama koje se sprovode tokom prerade pšenice, ali i na finalni prinos brašna.

Veličina i oblik zrna zavise od genetike pšenice (sorte) i uslova tokom kultivacije [20]. Pokazano je da se kod većih zrna pšenice, udeo endosperma povećava na uštrb omotača i klice [21]. Procentualni udeo osnovnih anatomskih delova, endosperma, klice i omotača kod krupnijih zrna iznosi 83,5%, 2,5% i 14,0%; a kod sitnijih 81,0%, 3,5%, i 15,5%, respektivno [40]. Stoga je očekivano da se usitnjavanjem većih zrna pšenice postigne viši stepen izbrašnjavanja. Ispitivanja [41,42] su pokazala da krupnija zrna u fazi krupljenja daju veći prinos krupnih frakcija izvoda - krupnog griza, čijim će se usitnjavanjem u fazi mlevenja griza i osevaka dobiti brašno, a manji prinos frakcija sitnog griza, osevaka i brašna. Posmatrano sa tehnološkog aspekta ovo je poželjno, jer je visok prinos krupnog griza osnovni preduslov za postizanje visokog prinosa brašna sa niskim sadržajem pepela. Pri istom nivou izbrašnjavanja, brašno dobijeno usitnjavanjem krupnijih zrna imaće manji sadržaj pepela od brašna dobijenog usitnjavanjem sitnijih zrna. Sledstveno, za unapred zadati sadržaj pepela u brašnu, prinos brašna se smanjuje sa smanjenjem veličine zrna. Pored toga, krupna zrna imaju niži sadržaj proteina od sitnih zrna, posmatrano unutar iste sorte pšenice. Ipak, poređenjem sadržaja proteina u celom zrnju i u brašnu ustanovljeno je da je gubitak proteina manji kod usitnjavanja krupnijih zrna, što ukazuje da se proteini prilikom usitnjavanja različito preraspodeljuju po frakcijama mliva, a u zavisnosti od veličine zrna [21,41]. Pored toga, u postupku usitnjavanja pšeničnog zrna odnos razmaka između valjaka i veličine zrna presudno utiče na intenzitet usitnjavanja [43]. Stoga se podešavanje radnih elemenata mlina (razmak između valjaka) vrši u odnosu na veličinu zrna, a dodatna fizička karakteristika koja igra bitnu ulogu jeste ujednačenost zrnene mase. Ukoliko zrna nisu ujednačene veličine, teže je postaviti odgovarajuće parametre čišćenja, kondicioniranja ili usitnjavanja pšenice, odnosno postići stabilizaciju osnovnih etapa tehnološkog postupka mlevenja [44].

Staklavost endosperma je fizički pokazatelj koji zavisi od strukture endosperma, a manifestuje se kao izgled preseka zrna pšenice. Kod staklavijih zrna skrobne granule su gusto upakovane u proteinski matriks koji je kontinualan bez izraženih vazdušnih međuprostora, dok se kod zrna brašnave strukture među skrobnim granulama nalaze neispunjeni (vazdušni) prostori. Zrna se u zavisnosti od nivoa staklavosti ili brašnavosti usitnjavaju na različit način, odnosno daju različitu strukturu mliva (raspodelu veličina čestica mliva). Prilikom mlevenja prednost se daje staklavijoj pšenici jer daje veće iskorišćenje u brašnu, sa obzirom da u fazi krupljenja daje više griza [45]. Sa druge strane, pokazano je da sa povećanjem staklavosti raste energija potrebna za usitnjavanjem [44].

Zapreminska masa je fizički parametar koji govori o masi (kg ili tone) 1 m<sup>3</sup> određenog uzorka pšenice. Budući da endosperm ima veću specifičnu težinu (1,46 g/cm<sup>3</sup>) od omotača (1,27 g/cm<sup>3</sup>), veća zapreminska masa može da ukaže na veći udeo i kompaktniju strukturu endosperma (staklaviji endosperm), a time i na veći mlevni potencijal pšenice [21]. Međutim, mnogi drugi faktori (oblik zrna, ujednačenost veličine zrna, sadržaj i svojstva prisutnih primesa, sadržaj vode i dr.) dodatno utiču na vrednost zapreminske mase pšenice, pa se ne može potpuno pouzdano predvideti prinos brašna samo na osnovu ovog pokazatelja [46].

Kao pouzdaniji pokazatelj u odnosu na zapreminsku masu često se koristi masa 1000 zrna. Ona predstavlja masu suve materije 1000 zdravih, neoštećenih i normalno sazrelih zrna žita izraženu u gramima. Prednost mase 1000 zrna u odnosu na zapreminsku masu je u tome što njena vrednost zavisi isključivo od veličine i strukture zrna, dok sadržaj primesa, oštećenih zrna, sadržaj vlage i drugi parametri ne utiču na rezultat. Zato ovaj fizički parametar ima visoku korelacionu zavisnost sa prinosom brašna i pruža mlinarima važne informacije o mlevnom potencijalu pšenice [21].

### 2.2.3 Strukturno-mehanička svojstva pšeničnog zrna

Sa tehnološkog aspekta posmatrano, pored fizičkih značajnu ulogu imaju i strukturno-mehanička svojstva zrna. Ona određuju kako će se zrno ponašati prilikom usitnjavanja. Na osnovu njih postavljaju se parametri usitnjavanja, a u zavisnosti od njih menja se prinos, kvalitet proizvoda i utrošak energije prilikom usitnjavanja [14]. Strukturno-mehanička svojstva pšeničnog zrna ispoljavaju se pri delovanju statičkih i dinamičkih opterećenja na zrno, a svojstva koja su od važnosti su čvrstoća, tvrdoća, elastičnost i plastičnost.

Otpornost zrna na drobljenje definiše se kao čvrstoća. Čvrstoća zrna varira u zavisnosti od njegove veličine tako da sitnija zrna imaju veću čvrstoću od krupnijih [14]. Razlog tome je veći udeo omotača u sitnijim zrnima u odnosu na krupnija. Umreženi arabinoksilani koji se nalaze u ćeljskim zidovima aleuronskog sloja čine omotač pšeničnog zrna izrazito čvrstim, a samim tim i zrna koja sadrže već udeo omotača [37].

Tvrdoća zrna je sposobnost spoljašnjih delova da se odupru prodiranju stranog tela, a od osnovnih anatomskih delova pšeničnog zrna, endosperm ima najveću tvrdoću [47]. Ispitivanjem mnogih autora pokazano je da na mikrotvrdoću endosperma presudno utiče

priroda i jačina veze između skroba i proteina [39,48–55]. Stoga i ne čudi što se tvrdoća zrna pšenice dovodi u vezu sa staklavošću iako ova dva pokazatelja suštinski predstavljaju različita svojstva zrna [34]. Tvrdoća je sposobnost zrna da se suprotstavi deformaciji, a skaklavost vizuelna ocena izgleda preseka zrna. Pokazano je i da postoji razlika u načinu usitnjavanja tvrdih i mekših zrna. Usitnjavanjem tvrdih zrna dobija se mlivo sa ujednačenijom raspodelom veličina čestica, ali sa većim stepenom mehaničke oštećenosti skroba. Usitnjavanjem meke pšenice skrobne granule se lakše oslobađaju iz proteinskog matriksa, i to bez oštećenja. Mlivo koje se ovim putem dobija ističe se većim prinosom krupnijih i sitnijih čestica, odnosno sa heterogenijom raspodelom veličine čestica [36, 39, 46, 53–61]. Tvrdoća endosperma značajno utiče i na potrošnju energije potrebne za usitnjavanje pšenice u svim fazama tehnološkog postupka mlevenja pšenice, a time i na ukupni utrošak energije celokupnog tehnološkog procesa [34,65–67].

Od preostalih strukturno-mehaničkih osobina materijala, od važnosti su još i elastičnost, plastičnost i relaksaciona svojstva. Elastičnost se definiše kao sposobnost materijala da se nakon dejstva sile vrati u prvobitan oblik, dok je plastičnost svojstvo materijala koje čini da telo nakon prestanka delovanja sile ostaje trajno deformisano. Zrna sa izraženim relaksacionim svojstvima imaju mogućnost da prelaskom iz elastičnih u plastične deformacije postepeno smanjuju naprezanje unutar svoje strukture, a koje je izazvano delovanjem neke sile deformacije [47]. Pšenica je, posmatrano sa aspekta prethodno navedenih strukturno-mehaničkih svojstava, materijal koji se nalazi između idealno elastičnog i idealno plastičnog.

Kod prerade zrnene mase do izražaja takođe dolaze i pojave međusobnog trenja između zrna, a postoji i uticaj međuprostora između zrna i drugo. Prilikom usitnjavanja pšenice uzimaju se u obzir sve strukturno-mehaničke osobine i spram njih se postavljaju parametri kako u fazi pripreme pšenice za mlevenje, tako i tokom usitnjavanja.

## 2.3 OSNOVNI ZADACI TEHNOLOŠKOG POSTUPKA MLEVENJA PŠENICE

Cilj tehnološkog postupka mlevenja pšenice je usitnjavanje endosperma i dobijanje što većeg prinosa brašna, uz istovremeno postizanje separacije endosperma od omotača i klice, kako bi se dobilo brašno zadovoljavajućeg kvaliteta [32,68]. Usitnjavanje zrna treba da bude izraženo selektivno. Endosperm ne treba da se usitnjava istovremeno i u istom stepenu kao i omotač, aleuronski sloj i klica; ovi anatomske delovi zrna treba što potpunije da se izdvoje u vidu mekinja [60,69]. Selektivnost usitnjavanja ostvaruje se odgovarajućim postupkom pripreme pšenice za mlevenje, postepenim usitnjavanjem na određenom broju prolazišta mlevenja<sup>3</sup> i odabirom optimalnih parametara usitnjavanja i prosejavanja [32,70,71].

Kondicioniranjem zrna, u sklopu pripreme pšenice za mlevenje, odnosno pri optimalnom sadržaju i raspodeli vode po preseku zrna, naglašavaju se razlike u strukturno-mehaničkim svojstvima osnovnih anatomske delova zrna, što omogućava njihovu efikasniju separaciju. Pored toga, neophodno je optimalno vođenje operacija usitnjavanja i prosejavanja, što se postiže podešavanjem parametara postupka [34]. Tehnološki postupak mlevenja pšenice zasniva se na naizmeničnom usitnjavanju na mlinskim valjcima i prosejavanju mliva na planskim sitima. Tokom ovih operacija, deo materijala sa planskog sita se izvodi iz postupka, dok se deo materijala u skladu sa dijagramom mlevenja vodi na neko od narednih prolazišta mlevenja. U nizu prolazišta, veoma je važno podestiti parametre usitnjavanja i prosejavanja da budu na optimalnim vrednostima, kako bi se izbegli negativni efekti prethodnih prolazišta na pokazatelje efektivnosti postupka.

Za praćenje efektivnosti postupka usitnjavanja po pojedinim fazama i u celini koriste se kvantitativni, kvalitativni i energetski pokazatelji efektivnosti usitnjavanja [72]. Navedeni pokazatelji ukazuju na stanje i tehničko-energetsku racionalnost tehnološkog postupka i određuju prios i kvalitet finalnih proizvoda.

### 2.3.1 Usitnjavanje pšeničnog zrna mlinskim valjcima

U komercijalnim mlinovima za proizvodnju pšeničnog brašna kao osnovni uređaji za usitnjavanje koriste se mlinski valjci. Zastupljenost mlinskih valjaka posledica je činjenice da u odnosu na druge tipove uređaja za usitnjavanje omogućavaju najefikasnije, selektivno i kontrolisano usitnjavanje [21].

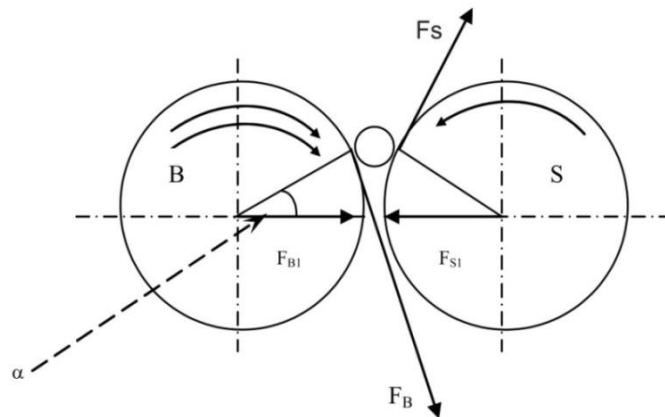
Obrćući se jedan prema drugom različitim obimnim brzinama valjci deluju na česticu izlažući je silama deformacije i na taj način je usitnjavaju. Prostor u kom je čestica izložena silama deformacije naziva se mlevni prostor. Dužina mlevnog prostora je jednaka dužini obima od tačke u kojoj čestica prvi put dođe u kontakt sa valjcima pa do tačke najužeg razmaka između

---

<sup>3</sup> Prolazište ili pasaža mlevenja je kombinacija od najmanje jednog para valjaka i jednog odeljenja planskog sita. Na istom prolazištu mlevenja može biti angažovano i više pari valjaka i više odeljenja planskog sita, pod uslovom da obrađuju jednorodan materijal.



valjaka. Na česticu u mlevnom prostoru valjaka istovremeno deluju dve vrste sila: sile smicanja ( $F_B$  i  $F_S$ ) i sila sabijanja ( $F_{B1}$  i  $F_{S1}$ ) (Slika 2.4).



**Slika 2.4.** Princip delovanja sila deformacija u mlevnom prostoru valjaka [34]

U mestu na kojem čestica prvi put dolazi u kontakt sa površinama oba rotirajuća valjka na česticu deluju sile smicanja sa strane brzohodnog ( $F_B$ ) i sporohodnog ( $F_S$ ) valjka. Sile su orijentisane tangencijalno na površinu valjka. Zahvaljujući razlici u obimnim brzinama, sila brzohodnog valjka teži da uvuče česticu unutar mlevnog prostora, dok sila smicanja sporohodnog valjka pokušava da izbaciti česticu iz mlevnog prostora. Delujući na taj način, sile  $F_B$  i  $F_S$  stvaraju uslove da dođe do drobljenja čestice pod uticajem sile smicanja. Odnos sila  $F_B$  i  $F_S$  određen je prenosnim odnosom (odnos obimnih brzina brzohodnog i sporohodnog valjka), a intenzitet sila raste sa povećanjem obimnih brzina valjaka. Pored sila smicanja, u mlevnom prostoru čestice su izložene i silama sabijanja ( $F_{B1}$  i  $F_{S1}$ ). Pritisak sila  $F_{B1}$  i  $F_{S1}$  određuje intenzitet sabijanja čestice u mlevnom prostoru zavisno od razmaka između valjaka i specifičnog opterećenja valjaka, ali i strukturno-mehaničkih osobina materijala koji se usitnjava. Ove sile maksimalnim intenzitetom deluju na česticu na kraju mlevnog prostora, na mestu gde se površine valjaka nalaze najbliže jedna drugoj (najmanji razmak između valjaka) [19].

Promenama parametara usitnjavanja: prenosnog odnosa, obimne brzine valjaka, razmaka između valjaka i specifičnog opterećenja valjaka uticaj pomenutih sila se menja, jer se menja i njihov intenzitet, relativan odnos i brzina kojom se prenose sile deformacije na česticu. Kod glatkih valjaka sa nažlebljenom površinom usitnjavana čestica se izlaže i dodatnoj deformaciji – rezanju [47].

### 2.3.2 Uticaj parametara usitnjavanja na efektivnost mlevenja mlinskim valjcima

Pored pomenutih strukturno-mehaničkih svojstava materijala i fizičko-hemijskih osobina, na efekte usitnjavanja ključni uticaj imaju parametri usitnjavanja [7]. Parametri usitnjavanja se prema svom karakteru mogu podeliti u sledeće tri grupe:

- tehnološki parametri usitnjavanja (razmak između valjaka i specifično opterećenje valjaka),
- kinematički parametri usitnjavanja (prenosni odnos, obimne brzine valjaka, razlika obimnih brzina valjaka) i
- geometrijski parametri usitnjavanja (dužina trupaca i njihov prečnik, karakteristike radne površine valjaka (glatka ili žlebljena), gustina žlebova odnosno broj žlebova po centimetru obima valjka, ugao i nagib pod kojima su žlebovi postavljeni, međusobni položaj žlebova i drugi).

Promenom pomenutih parametara menja se karakter i intenzitet sila deformacije kojima je materijal izložen u mlevnom prostoru, a samim tim menja se i stepen usitnjenosti mliva [4,43]. Razmak između valjaka i specifično opterećenje valjaka (u relativno užem opsegu) moguće je podešavati u pogonskim uslovima za vreme rada pogona, što čini tehnološke parametre usitnjavanja jednim operativnim parametrima.

Razmak između valjaka bitno utiče na efekte usitnjavanja, jer se njegovom promenom menja odnos veličina sila smicanja i sabijanja u mlevnom prostoru. Kada je razmak između valjaka manji, raste naprezanje čestica materijala, što dovodi do veće usitnjenosti mliva [69]. Dodatno, smanjenje razmaka između valjaka doprinosi povećanju dužine mlevnog puta. Time su čestice materijala duže izložene silama deformacije u mlevnom prostoru, što uzrokuje veći stepen njihovog usitnjavanja [4]. Ipak, prilikom tumačenja uticaja razmaka između valjaka na efekte usitnjenosti u obzir treba uzeti i veličinu čestica usitnjavanog materijala. Odnos veličine čestica koje se usitnjavaju i razmaka između valjaka determiniše stepen usitnjenosti mliva [8,73]. Fišteš i Tanović [42,74] su na primeru usitnjavanja pšeničnog zrna na prvom prolazištu krupljenja takođe pokazali da pri nepromenjenom razmaku između valjaka, krupnoća usitnjvanih čestica utiče na kvantitativne, kvalitativne i energetske pokazatelje efektivnosti usitnjavanja. Ukoliko je razmak između valjaka konstantan, sile naprezanja krupnijih čestica su veće i one se više usitnjavaju od sitnijih čestica. Mnogi autori [8,43,59,69,73,75–77] pokazali su da u fazi krupljenja, smanjenje razmaka između valjaka povećava prinos ukupnog izvoda<sup>4</sup>, a Pančenko [72] navodi da je zavisnost između ova dva faktora eksponencijalna i predstavlja je jednačinom:

$$I = me^{-nx}, \quad (2.7)$$

u kojoj  $I$  predstavlja ukupan izvod koji se izražava u procentima, dok je  $x$  razmak između valjaka izražen u metrima. Oznake  $m$  i  $n$  su eksperimentalni koeficijenti.

Osim u fazi krupljenja, tokom koje se koriste valjci sa žljebljenom radnom površinom, uticaj razmaka između valjaka na efekte usitnjavanja ispitivan je i u fazi mlevenja griza i osevaka, kada su u upotrebi glatki valjci. Scanlon i saradnici [78] su pokazali da pri nepromenjenim ostalim parametrima usitnjavanja, smanjenje razmaka između valjaka utiče na porast prinosa brašna i utroška energije potrebne za usitnjavanje, kao i na stepen mehaničke oštećenosti skroba. Sa druge strane, pokazalo se da razmak između valjaka ne ispoljava uticaj na sadržaj

---

<sup>4</sup> Propad kroz sito određene veličine otvora

pepela, niti na sadržaj proteina u brašnu. Autori navode da smanjenje razmaka dovodi do promene odnosa između sila sabijanja i smicanja koje valjci ispoljavaju na usitnjavani materijal. Klica i omotač se, kao plastična tela, pri takvim uslovima usitnjavaju u manjem stepenu u odnosu na endosperm, koji se kao drobivo telo više usitnjava.

Izrazito mali razmak između valjaka (0,03 – 0,05 mm) na poslednjim prolazištima mlevenja osevaka može uticati na povišeno zagrevanje materijala usled visokog pritiska na čestice u mlevnom prostoru. Time deformacije postaju plastične, odnosno delom dolazi do promene oblika deformacije, što može da dovede do smanjenja stepena usitnjenosti mliva [34].

Drugi operativni parametar – specifično opterećenje valjaka – izražava se kao masa usitnjavanog materijala koja u određenom vremenskom intervalu dolazi na jedinicu dužine valjaka određenog prolazišta mlevenja. Pored specifičnog, koristi se i prosečno specifično opterećenje koje je određeno masom materijala (što u suštini predstavlja kapacitet mlina) koja u određenom vremenskom intervalu dolazi na jedinicu ukupne valjne dužine. Povećati specifično opterećenje valjaka znači povećati količinu materijala koju valjci treba da usitne u određenom vremenskom intervalu. Ovakva promena utiče na odnos sila smicanja i sabijanja koje deluju u mlevnom prostoru, a pri izrazito velikim opterećenjima usled visokog pritiska u mlevnom prostoru dolazi i do povećanog zagrevanja materijala koji se usitnjava i pojave plastičnih deformacija. Usled pojačanog dejstva sila sabijanja u mlevnom prostoru može da dođe i do razmicanja trupaca (povećanja razmaka između valjaka), što dalje utiče na smanjenje stepena usitnjenosti mliva [69]. Pored toga, povećanjem specifičnog opterećenja valjaka smanjuje se selektivnost usitnjavanja, ali se istovremeno povećava kapacitet prerade. Stoga je neophodno korigovati obimne brzine valjaka tako da ne dođe do zagušenja valjaka. Prema Periju i Čiltonu [79] odnos specifičnog opterećenja i obimnih brzina valjaka određuje stepen usitnjavanja. Ukoliko se obimne brzine drže konstantnim, a povećava specifično opterećenje, smanjiće se nivo usitnjavanja čestica u mlevnom prostoru. Sa druge strane, povećavanje obimnih brzina kada se specifično opterećenje održava konstantnim prouzrokuje povećanje intenziteta usitnjavanja čestica.

Mnogi autori ispitivali su uticaj specifičnog opterećenja na efekte usitnjavanja u fazi krupljenja [72,75,80,81]. Pomenuta istraživanja bavila su se usitnjavanjem na jednom ili dva prolazišta krupljenja, dok je kasnijim istraživanjem Tanovića [69] data analiza uticaja specifičnog opterećenja na efekte usitnjavanja na svih pet prolazišta krupljenja.

Istraživanjem Scanlona i Dextera [82] pokazano je da povećanje specifičnog opterećenja tokom mlevenja griza glatkim valjcima prouzrokuje smanjenje prinosa brašna, uz istovremeno povećanje sadržaja pepela u brašnu i povećanje specifičnog utroška energije potrebne za operaciju usitnjavanja. Sa druge strane, kada je specifično opterećenje smanjeno, prinos brašna je porastao, a zapažen je dodatni pozitivan uticaj na kvalitet brašna – sadržaj pepela u brašnu je opao, dok je boja tako dobijenog brašna bila svetlija. Pritom, specifično opterećenje valjaka nije ispoljilo uticaj na mehaničku oštećenost skroba.

Sa manjim specifičnim opterećenjima valjaka smanjuje se i specifični utrošak energije potrebne za usitnjavanje. Ipak, pri manjem specifičnom opterećenju manja je masa materijala koju mlin može da obradi u jedinici vremena, što znači da se smanjuje kapacitet mlina. Na taj

način se smanjenjem specifičnog opterećenja valjaka povećava ukupna energija i troškovi potrebni za proizvodnju jedinice mase brašna. Iz toga sledi da nije moguće povećati racionalnost mlina bez relativno visokog specifičnog opterećenja valjaka. Smatra se da prosečno specifično opterećenje valjaka u mlinu ne bi trebalo da bude manje od 70 kg/cm·dan, a da kod racionalnijih mlinova treba da doseže 90 kg/cm·dan, pa i više [34].

Obimne brzine valjaka značajno utiču na brzinu prenošenja sila deformacija na čestice usitnjavanog materijala. Merko [72,83] je pokazao da se pri većim obimnim brzinama povećava i intenzitet sila koje deluju na čestice u mlevnom prostoru, čime raste i stepen njihove usitnjenosti. Međutim, brašno i međuproizvodi mlevenja dobijeni usitnjavanjem pri većim obimnim brzinama su lošijeg kvaliteta, što je manje izraženo kod prolazišta prvog kvaliteta (I-III krupač i prva prolazišta mlevenja griza), a naročito izraženo kod prolazišta koje obrađuju materijal drugog kvaliteta (IV i V krupač i poslednja prolazišta u fazi mlevenja griza i osevaka) [69,72]. Takođe, veće obimne brzine iziskuju veću snagu za pokretanje i održavanje valjaka na zadatoj brzini, čime se povećava utrošak energije u mlinu. Zato je obimne brzine neophodno postaviti tako da se isprate sveobuhvatni zahtevi za ekonomičan i racionalan rad mlina. Brzine treba postaviti na kompromisnu vrednost pri kojoj će kvalitet brašna i međuproizvoda biti odgovarajući, a potrošnja energije što manja, ali koje će ujedno biti u mogućnosti da odgovore zahtevima specifičnog opterećenja valjaka, odnosno kapaciteta mlina.

Mnogi autori bavili su se ispitivanjem uticaja obimnih brzina valjaka na efekte usitnjavanja upravo sa namerom da definišu optimalne brzine valjaka u fazi krupljenja i u fazi mlevenja griza i osevaka [69,72,75,81,84,85]. Ipak, u navedenim istraživanjima nije jednoznačno određeno koji je optimalni nivo obimnih brzina i predložen interval je još uvek širok, zavisi od prolazišta mlevenja i kreće se u granicama od 4-5 m/s [72] pa ide i do 12 m/s [84].

Scanlon i Dexter [82] su istraživali kako se promena obimne brzine brzohodnog valjka sa 460 o/min na 550 i 780 o/min (navedene brzine pri standardnom prečniku valjaka od 0,25 m iznose 6,0, 7,2 i 10,2 m/s, respektivno) odražava na prinos i kvalitet brašna kao i na potrošnju energije. Pokazano je da se pri konstantnom prenosnom odnosu, upotrebom glatkih valjaka, povećanjem obimnih brzina povećava prinos brašna koje tada biva svetlije boje i sadrži manji udeo pepela. Dodatno, pokazalo se da je pri većim brzinama potrošnja energije bila u porastu. Do sličnih zaključaka došli su i Fišteš i Tanović [86] koji su ispitivali kako promena obimne brzine pri konstantnom prenosnom odnosu utiče na pokazatelje efektivnosti usitnjavanja griza. Pokazano je da stepenastim ubrzavanjem valjaka u opsegu od 3 m/s do 6 m/s, pri konstantnom prenosnom odnosu ( $i=1,25$ ) prinos brašna raste, uz povećanje specifičnog utroška energije potrebne za mlevenje. Autori ne navode zapažen uticaj obimnih brzina na sadržaj pepela u brašnu.

Prenosni odnos određen je odnosom obimnih brzina brzohodnog i sporohodnog valjka, odnosno odnosom njihovog broja obrtaja ( $i = \frac{v_b}{v_s} = \frac{n_b}{n_s}$ ). Prenosni odnos utiče na sile smicanja i sabijanja u mlevnom prostoru tako da sa većim prenosnim odnosom izraženije postaju deformacije smicanja, dok se sile sabijanja smanjuju [4,83]. Usitnjavanje pri većim prenosnim odnosima rezultira većim stepenom usitnjenosti mliva, ali tako dobijeno mlivo sadrži veći

udeo pepela, naročito kada se melju materijali koji sadrže veći udeo omotača (prolazišta drugog kvaliteta) [72].

Mnogi autori su se bavili ispitivanjem uticaja prenosnog odnosa na efekte mlevenja žlebljenim valjcima [62,69,72,75,80]. U praksi se, prilikom usitnjavanja žlebljenim valjcima, prenosni odnos uglavnom postavlja na vrednost od 2,5, jer prinos ukupnog izvoda naglo raste sa povećanjem prenosnog odnosa do 2,5 (asimptotski se približava nekoj vrednosti), a iznad 2,5 dolazi do uočljivijeg pogoršanja kvaliteta izvoda (povećava se sadržaj pepela).

U okviru ove disertacije matrice usitnjavanja primenjene su za kontrolu efekata usitnjavanja u fazi krupljenja, dok je metoda odzivne površine primenjena za kontrolu efekata usitnjavanja u fazi mlevenja griza i osevaka. Sa obzirom da je uticaj promene parametara usitnjavanja na efekte mlevenja ispitivan samo u fazi mlevenja griza i osevaka, daće se nešto detaljniji prikaz uticaja prenosnog odnosa prilikom mlevenja griza glatkim valjcima.

Merko [72] i Kupric [81] navode da se kod prolazišta mlevenja griza i osevaka pri konstantnoj obimnoj brzini sa porastom prenosnog odnosa postiže veći prinos brašna, ali i porast u sadržaju pepela. Autori navode i to da se specifični utrošak energije potreban za dobijanje jedinice mase brašna smanjuje do određenog nivoa, a da se nakon toga potrošnja ponovo povećava. Istraživanja drugih autora [78,82,87–89] su takođe pokazala da povećanjem prenosnog odnosa rastu sadržaj pepela u dobijenim proizvodima, specifični utrošak energije po jedinici mase usitnjavanog materijala, kao i stepen mehaničke oštećenosti skroba.

Na prinos brašna prenosni odnos ispoljava karakterističan trend uticaja. Prvobitno se povećanjem prenosnog odnosa povećava i prinos brašna. Daljim povećavanjem, nakon što se premaši određena vrednost prenosnog odnosa, prinos brašna počinje da opada. Mnoga istraživanja potvrdila su postojanje prelomne tačke, ali se vrednost pri kojoj dolazi do pomenute promene trenda uticaja razlikuje od istraživanja do istraživanja. Prema Scanlonu i Dexteru [82] ova promena se odvija pri prenosnom odnosu 1,4, dok Scanlon i saradnici [78] navode vrednost 1,5. Za Eversa i saradnike [89] odgovarajuća vrednost je 1,25, a pri istom prenosnom odnosu su i Fišteš i Tanović [86] primetili prelomnu tačku.

Od kinematičkih parametara usitnjavanja na čestice u mlevnom prostoru utiče još i razlika između obimnih brzina brzohodnog i sporohodnog valjka. Kada se prenosni odnos održava konstantnim, sa porastom ove razlike deformacije se brže prenose na čestice, što rezultira većom usitjenošću mliva.

U poslednju grupu parametara usitnjavanja – geometrijske parametre usitnjavanja – spadaju prečnik valjaka, dužina valjaka i karakteristike radne površine valjaka.

Prečnik valjaka ( $D$ ) i dužina valjaka ( $l$ ) koji se koriste u industrijskim uslovima su danas standardizovani na  $D = 250$  mm i  $l = 800; 1000$  i  $1250$  mm.

Oblik i stanje radne površine valjaka značajno utiče na efekte usitnjavanja. U fazi krupljenja koriste se žlebljeni valjci, dok se u fazi mlevenja griza i osevaka koriste glatki valjci. Karakteristike radne površine valjaka kao što su: gustina žlebova, ugao i nagib pod kojim su

žlebovi postavljeni i uzajamni položaj žlebova, imaju izražen uticaj na usitnjavanje mliva i ta problematika je obrađena u mnogobrojnim istraživanjima [43,60,61,63,76,90–95].

Pokazano je da sa povećanjem gustine žlebova raste stepen usitnjavanja mliva, kao posledica većeg broja delovanja žlebova na česticu u mlevnom prostoru [4,72]. Sa druge strane, povećanjem nagiba žlebova snižava se stepen usitnjavanja mliva, jer se na taj način smanjuju sile smicanja koje deluju na čestice u mlevnom prostoru [83].

Na poprečnom preseku valjaka mogu se razlikovati dve nejednake bočne strane: uža strana – oštrica (O) i šira strana – leđa (L), koje formiraju ugao zaoštrenosti žleba. Normala na osu valjaka deli ugao zaoštrenosti žleba na ugao oštrice i ugao leđa [47]. Sa povećanjem oštine navedenih uglova izraženije su deformacije rezanja u mlevnom prostoru. Na osnovu uzajamnog položaja žlebova valjaka, moguća su četiri različita položaja:

- oštrica-oštrica (O/O),
- leđa-leđa (L/L),
- oštrica-leđa (O/L) i
- leđa-oštrica (L/O).

Promenom uzajamnog položaja žlebova menja se karakter sila deformacije u mlevnom prostoru. Deformacije rezanja su karakteristične za uzajamni položaj O/O, dok u položaju L/L preovlađuju deformacije sabijanja. Deformacije rezanja pokazale su se kao najefikasnije za usitnjavanje. Pri položaju O/O ostvaruje se visok stepen usitnjavanja endosperma i omotača uz mali utrošak energije. Pri odnosu žlebova L/L omotač se usitnjava u manjem stepenu, ali je utrošak energije za usitnjavanje veći. Efekti usitnjavanja pri kombinovanim položajima (O/L i L/O) kreću se u granicama osnovnih varijanti, s tim što se položaj žlebova u odnosu L/O ne koristi u praksi [43,62].

### **2.3.3 Kratak prikaz tehnološkog postupka mlevenja pšenice**

Tokom postupka dobijanja pšeničnog brašna, usitnjavanje predstavlja najvažniju procesnu operaciju. Tehnološki postupak mlevenja pšenice može se podeliti u dve osnovne faze: krupljenje i mlevenje griza i osevaka [21].

#### **2.3.3.1 Usitnjavanje pšenice u fazi krupljenja**

Prva i ujedno najznačajnija faza tehnološkog postupka dobijanja pšeničnog brašna od čijeg vođenja zavisi uspeh celokupnog postupka jeste krupljenje [34]. Osnovni cilj krupljenja je da se pšenično zrno otvori, da se endosperm što efikasnije razdvoji od omotača, aleuronskog sloja i klce, odnosno da se dobije 65-70% čestica endosperma u obliku griza i osevaka (oslobođenih od omotača, aleuronskog sloja i klce) odgovarajuće krupnoće zbog efikasnijeg prosejavanja na planskim sitima i daljeg obogaćivanja (čišćenja) na čistilicama griza, pri

čemu je poželjno ostvariti što veći prinos krupnijih frakcija griza, uz relativno manju prinos sitnog griza i brašna [21,36]. Da bi se to postiglo, pšenica se podvrgava višestepenom usitnjavanju na većem broju prolazišta kojih najčešće ima od 4 do 5 [36].

Kvalitet i prinos brašna koje se dobija usitnjavanjem griza i osevaka direktno zavisi od prva tri prolazišta krupljenja, dok zadnja prolazišta treba da uklone zaostale čestice endosperma od mekinjastog materijala [72].

Za usitnjavanje materijala u fazi krupljenja koriste se žlebljeni valjci. Broj žlebova po obimu valjaka i njihov nagib raste od prednjih prema zadnjim prolazištima krupljenja, dok se razmak između valjaka smanjuje [83].

Na svakom prolazištu krupljenja, dobijeno mlivo se prosejavanjem razvrstava na sledeće frakcije:

- krupni i sitni prelaz krupljevine,
- krupni, srednji i sitni griz,
- osevke i
- brašno [34].

Svaka od dobijenih frakcija nastavlja svoj put dalje kroz postupak proizvodnje, pa se tako prelazi krupljevine usmeravaju na odgovarajuće prolazište krupljenja, dok se griz vodi na čistilice griza nakon čega se usitnjava. Osevcu se razvrstavaju na sortirer sitima, a zatim se vode na mlevenje osevaka. Kao krajnji proizvod tehnološkog postupka izdvajaju se pasažna brašna [69].

### *2.3.3.2 Čišćenje griza*

Griz dobijen nakon razvrstavanja mliva na planskim sitima sastoji se od čestica čistog endosperma, zatim od okrajaka koji predstavljaju čestice endosperma uz koje su priljubljene čestice omotača i od čestica omotača koje sadrže zanemarljive količine endosperma. Čišćenje griza obavlja se na čistilicama griza, a razdvajanje se obavlja na osnovu razlika u krupnoći i aerodinamičkim osobinama pomenutih čestica mliva [21]. Nakon obrade griza na čistilicama, kao frakcije se izdvajaju:

- propad – čist griz različite krupnoće;
- prelaz – frakcija najbogatija okrajcima;
- prelet koji čine čestice čistog omotača i
- odlet sačinjen od brašna i sitnih delića omotača, a koji biva odnešen vazдушnom strujom.

Cilj čišćenja griza je izdvajanje čestica čistog endosperma i njegovo razvrstavanje prema krupnoći uz dodatno odvajanje čestica brašna u materijalima koji nisu dobro odbrašnjeni, a dolaze na čistilice griza.

Frakcije koje se izdvajaju na čistilicama griza usmeravaju se dalje na obradu, pa se tako propad, odnosno čist griz usmerava na odgovarajuće prolazište u fazi mlevenja griza i osevaka. Okrajci se, kao frakcija prelaza usmeravaju na adekvatno prolazište krupljenja, s tim da je neophodno voditi računa kako ne bi došlo do kruženja mliva u okviru istog prolazišta mlevenja ili kako se materijal ne bi vraćao na prethodna prolazišta. Međuproizvodi mlevenja treba uvek da se usmeravaju na naredna prolazišta mlevenja [34].

### **2.3.3.3 Mlevenje griza i osevaka**

Postupak usitnjavanja griza i osevaka odvija se u dve etape:

- rastvaranje griza i
- mlevenje griza i osevaka.

Cilj rastvaranja griza jeste da se čestice omotača odvoje od endosperma i da se dobije čist i usitnjen griz, uz proizvodnju relativno manje količine brašna [21]. Ipak, smanjenjem broja prolazišta mlevenja u cilju racionalizacije tehnološkog postupka, sve više se smanjuje jasno izražena razlika između prolazišta rastvaranja i mlevenja griza. Mlevenje srednjeg i sitnog griza i osevaka predstavlja finalni korak tehnološkog postupka mlevenja pšenice, a koji za osnovni cilj ima dobijanje što većeg prinosa brašna sa odgovarajućim sadržajem pepela [34]. U savremenim racionalnim mlinovima ova faza mlevenja obuhvata ne više od 6 do 8 prolazišta mlevenja [34].

Parametri u fazi mlevenja griza i osevaka postavljeni su tako da se u mlevnom prostoru intenziviraju sile sabijanja. Koriste se glatki valjci sa malim prenosnim odnosom koji najčešće iznosi oko 1,25. Razmak između valjaka se postepeno smanjuje od prolazišta rastvaranja griza (gde iznosi oko 0,15 mm) prema poslednjim prolazištima mlevenja griza i osevaka (gde je oko 0,03 mm, a u nekim slučajevima i manji od toga).

Nakon usitnjavanja dobijeno mlivo se prosejava na planskim sitima, a dobijene frakcije su najčešće dva ili tri pasazna brašna koja se razlikuju po granulaciji i prelazi koje čine ili pretežno grizaste ili pretežno mekinjaste čestice, a u zavisnosti od toga se prelazi vode ili na neka od sledećih prolazišta mlevenja griza i osevaka ili na odgovarajuće prolazište krupljenja (uz uslov da ne dolazi do kruženja mliva).

### **2.3.4 Pokazatelji efektivnosti tehnološkog postupka mlevenja pšenice**

Kao što je prethodno pomenuto, za ocenu efektivnosti postupka usitnjavanja koriste se tri grupe pokazatelja:

- kvantitativni,
- kvalitativni i
- energetske pokazatelji.



Stepen usitnjavanja je osnovni kvantitativni pokazatelj efektivnosti usitnjavanja. Predstavlja odnos ukupne površine čestica materijala nakon i pre usitnjavanja ili odnos prosečne veličine čestica pre i nakon operacije usitnjavanja. U praksi se, međutim, češće koristi granulacioni sastav mliva kao indirektni kvantitativni pokazatelj efektivnosti usitnjavanja, a koji se određuje analizom sejanja [34].

Analiza sejanja je jedna od osnovnih analitičkih metoda koja se primenjuje u pogonskoj i laboratorijskoj kontroli industrije za preradu žita [19]. Izvodi se prosejavanjem usitnjenog materijala kroz slog sita formiran tako da se veličina otvora na presvlakama ravnomerno smanjuje od vrha prema dnu, dok je na kraj smešteno metalno dno. Nakon određenog vremena, koje se podešava spram materijala koji se prosejava, merenjem se utvrde mase frakcija mliva koje zaostaju na ramovima i na metalnom dnu. Sledeći i finalni korak jeste izražavanje pojedinačnih frakcija u odnosu na početnu masu materijala koja se prosejavalala.

Pored toga što je analizom sejanja moguće određivanje granulacionog sastava mliva i brašna, na osnovu rezultata dobijenih analizom sejanja može se obavljati i pogonska kontrola rada osnovne opreme u mlinu – valjaka i planskih sita.

Osnovni indikator spram kojeg se izvode zaključci o efikasnosti rada mlinskih valjaka su prinos ukupnog izvoda za prva prolazišta krupljenja i prinos brašna za krajnja prolazišta krupljenja i prolazišta mlevenja griza i osevaka. Ukupni izvod predstavlja frakciju propada koja se dobije nakon prosejavanja mliva na situ sa otvorima određenih dimenzija.

Za prva tri prolazišta krupljenja frakcije izvoda predstavljaju frakcije griza, osevaka i brašna. Ovo su frakcije koje ne nastavljaju dalje usitnjavanje u ovoj fazi poput prelaza krupljevine, odnosno koje se izvode iz faze krupljenja i stoga se nazivaju izvodom. Prinos ukupnog izvoda dobija se kada se zbirna masa frakcija izvoda izrazi u procentima u odnosu na ukupnu masu materijala na datom prolazištu.

Sa druge strane, prinos brašna dobija se kada se masa brašna koja se izdvaja na datom prolazištu procentualno izrazi u odnosu na ukupnu masu mliva na datom prolazištu [19].

Za mlinara je veoma bitno da ima uvid u prinose ukupnog izvoda na prolazištima krupljenja, a naročito za prva tri prolazišta jer je njima određen prinos i kvalitet brašna koje se dobija usitnjavanjem griza i osevaka. Potencijalni prinos brašna u mlinu jednak je zbiru prinosa ukupnog izvoda sa prva tri prolazišta krupljenja. Tako bi, ukoliko je ciljani prinos brašna u mlinu 78%, prinos pojedinačnih izvoda sa prva tri krupača, računato u odnosu na prvi krupač u zbiru trebao da iznosi minimum 78% [47]. Vrednosti prinosa ukupnih izvoda u svakom mlinu variraju i određuju se na osnovu pšenice koja se obrađuje, postupka njene pripreme za mlevenje, dijagrama mlevenja i zadataka koji treba da budu ispunjeni tokom mlevenja (visina i struktura izbrašnjavanja). Iako ne postoji opšte pravilo kojim bi se odredilo koliki treba da budu prinosi ukupnog izvoda u svakom mlinu, postoje određene preporuke po pitanju racionalnog opsega na pojedinačnim prolazištima krupljenja. Na I krupaču nije racionalno da prinos ukupnog izvoda bude manji od 30%, ali ni veći od 40% jer se tada pogoršavaju kvalitativni pokazatelji. Racionalan okvir za prinos ukupnog izvoda na II krupaču je oko 30%, računato u odnosu na I krupač, odnosno od 40 do 50% računato u odnosu na dato prolazište.

Prinos ukupnog izvoda na III krupaču je manji nego na prva dva prolazišta krupljenja i kreće se u granicama od 12 do 16%, ako se posmatra u odnosu na I krupač, odnosno od 30 do 40% računato na masu materijala na III krupaču. Primeri prinosa ukupnog izvoda pri različitom vođenju krupljenja prikazani su u Tabeli 2.2.

Prinos ukupnog izvoda neophodno je kontrolisati prevashodno da bi se postigao zadovoljavajući nivo izbrašnjavanja, ali i da bi se rad mlina održao u ravnoteži. Od prinosa ukupnog izvoda na prolazištima krupljenja zavisi kako će se pojedine frakcije mliva rasporediti po narednim prolazištima i da li će biti usklađeni sa projektovanim kapacitetom – tačnije da li će oprema raditi pri adekvatnom specifičnom opterećenju.

**Tabela 2.2.** Prinosi ukupnog izvoda po pojedinim prolazištima krupljenja [21,40,96]

Primer [literatura]	Prolazište krupljenja	Prinos ukupnog izvoda (%) u odnosu na materijal koji se dovodi na dato prolazište krupljenja	Prinos ukupnog izvoda (%) u odnosu na masu zrna dovedenu na I krupljenje	Kumulativni prinos ukupnog izvoda (%)
1 [40]	I	30	30	30
	II	52	36	66
	III	35	12	78
	IV	14	3	81
	V	-	-	-
2 [21]	I	18,3	18,3	18,3
	II	48,2	39,4	57,7
	III	42,1	17,8	75,5
	IV	-	-	-
	V	-	-	-
3 [21]	I	27,5	27,5	27,5
	II	41,4	30,0	57,5
	III	42,6	18,1	75,6
	IV	-	-	-
	V	-	-	-
4 [96]	I	35	35	35,00
	II	45	29,25	64,25
	III	50	17,88	82,13
	IV	50	8,94	91,07
	V	30	6,26	93,75

Fowler [97] na primeru ilustruje da ukoliko neki mlin treba da obradi 20 tona pšenice po času, a da pritom željeni prinos ukupnog izvoda na I krupaču iznosi 30%, odstupanje od te vrednosti za 5% rezultovaće time da se jedna tona materijala više (ili manje; u zavisnosti od toga u kom pravcu vrednost prinosa ukupnog izvoda odstupa od ciljanog) po satu upućuje na

druga prolazišta mlevenja sa prvog krupača. Ovakva odstupanja mogu da dovedu do povećanog kruženja mliva, do preopterećenja valjaka, transportnih sistema, planskih sita, a dodatno mogu da utiču na prinos i kvalitet brašna koje se proizvodi.

Pored kontrole izvoda u fazi krupljenja, neophodno je kontrolisati i prinos brašna u fazi mlevenja griza i osevaka. Kao osnovni kvantitativni pokazatelj u ovoj fazi, prinos brašna bi trebalo da bude oko 30%, mada na nekim prolazištima može i da premaši tu vrednost, dok se vrednosti manje od 20% smatraju nezadovoljavajućim.

Kvantitativni podaci svih međuproizvoda i finalnih proizvoda mogu se prikazati pomoću distribucione tabele (Slika 2.5). Distribuciona tabela se formira na osnovu dijagrama mlevenja i podataka dobijenih merenjem svih pasaznih tokova. Prilikom unošenja podataka u distribucionu tabelu neophodno je da se svi maseni protoci preračunaju na istu jedinicu vremena.

Pre Bk	1 Bk	2 Bk	P-1	3 Bk	1,2,3 Red	P-2	P-3	P-4	C Siz	P-5	F Siz	1M	P-6	2M	2Q	4 Bk	P-7	3M	IT	4M	Suc	5 Bk	5M	B&S D	6M	Flour	BD	SD	Fged	Load From	Load To	2 min Load (c/ks)	
P-Bk	1079		6		6																			Sift	2.0					1093		1090	
1 Bk		725	219		93																					31.5				1069	1079	1076	
2 Bk			144	429	94																					36.1				703	725	732	
P-1				33					257		77											0.1								367	369	---	
3 Bk					40			95								263										37.4				436	462	496	
1,2,3 Bk Red						96	88								37											9.9				231	233	224	
P-2									5		38	56																		94	96	---	
P-3										5	71	0		12	Tr															83	88	---	
P-4									0		72	0			14															99	95	---	
C S i Z										215		7														15.1				248	257	251	
P-5											63	116		0	16															201	215	---	
F sig												66	129																	244	250	262	
1M													25	137																307	316	312	
P-6														123	26															152	154	---	
2M																20	134	0.3												305	309	310	
2Q																42	6	9												61	56	58	
4 Bk																	25													279	263	299	
P-7																			78	36										117	87	---	
3M																				4	56									170	218	172	
IT																					26									101	9	102	
4M																														110	94	124	
Suc																														14	---	17	
3 Bk																														232	234	230	
3M																														49	85	79	
Bd. SD																														17	48	---	54
Sift																																	
6M																														12	22	21	42
	1079	725	369	462	233	96	88	95	257	215	250	316	154	309	56	263	87	218	9	94					21	744.2	174	48	66				

Slika 2.5. Distribuciona tabela [98]

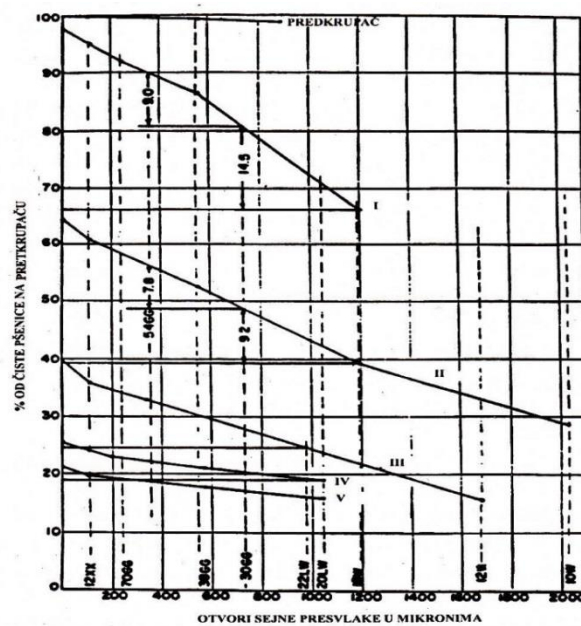
Navedena tabela preuzeta je iz američke literature [98] te su i podaci navedeni u odgovarajućim jedinicama – funtama (*lbs*) po času ( $1 \text{ lbs} \cdot 0,45395 = 1 \text{ kg}$ ). Sa leve strane tabele prikazana su prolazišta mlevenja ili mašine sa kojih dolazi materijal, a sa gornje strane tabele prikazana su prolazišta mlevenja ili mašine na koje su usmereni različiti materijali. Sabiranjem vrednosti u svakoj koloni stiče se uvid o količini materijala u određenom prolazištu mlevenja ili mašini, dok se na osnovu sume vrednosti u pojedinačnim redovima dobijaju vrednosti za količine mliva koje dolaze sa određenog prolazišta ili mašine.

Na primer, konkretnom primeru prikazanom Tabelom (Slika 2.5) prva čistilica griza označena je sa *P-1* i može se zaključiti da na nju dolazi 6 *lbs/h* sa predkrupljenja (*P-Bk*), 219 *lbs/h* sa prvog krupača (*1 Bk*) i 144 *lbs/h* sa drugog krupača (*2 Bk*). Sa iste čistilice usmerava se 33

lbs/h na treći krupač (3 Bk), 257 lbs/h na prolazište rastvaranje griza (C Siz), a 77 lbs/h na prolazište rastvaranja griza (F Siz), dok se na peti krupač (5 Bk) upućuje 0,1 lbs/h. Dodatno, u koloni naslovljenom sa *Flour* (brašno) naveden je maseni protok brašna na posmatranoj pasaži.

Na osnovu podataka iz distribucione tabele, mlinar može da sagleda kretanje mliva i da primeti ukoliko na pojedinim pasažama dolazi do kruženja mliva. Pored toga, moguće je uporediti stvarne sa projektovanim količinama međuproizvoda, a na osnovu toga i odrediti specifična opterećenja procesne opreme. Pomoću ovih podataka, mlinar može da koriguje odstupanja, usmeri međuproizvode unapred, na vreme izdvoji brašno odgovarajućeg kvaliteta iz mlevnog postupka i tako celokupno doprinese stabilizaciji tehnološkog postupka i postizanju ujednačenog kvaliteta finalnih proizvoda [21].

Spram podataka iz distribucione tabele moguće je konstruisati i granulacionu krivu (Slika 2.6) koja prikazuje stepen dezintegracije pšeničnog zrna u različitim etapama mlevnog postupka, odnosno raspodelu veličina čestica usitnjenog materijala.



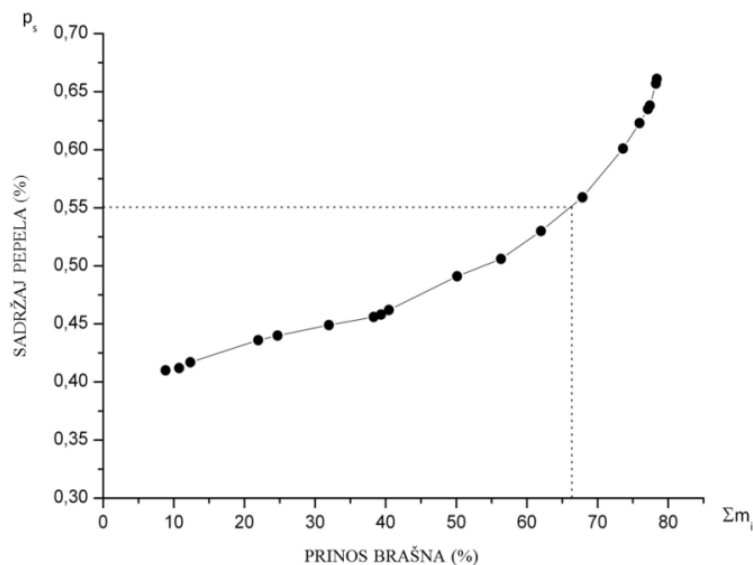
Slika 2.6. Granulaciona kriva

Prilikom formiranja granulacione krive na apscisu se navodi veličina otvora na sitima koja se koriste za prosejavanje, a na ordinatu kumulativni procentni udeo frakcija koje se na tim sitima izdvajaju. U konkretnom slučaju može se zaključiti da će, ukoliko se posmatra prvo prolazište krupljenja (označeno sa I) i ukoliko se koristi sito veličine otvora od 1200  $\mu\text{m}$ , kao prelaz da se izdvoji 66% materijala. Sa druge strane, ukoliko se za isto prolazište koristi sito sa veličinom otvora od 400  $\mu\text{m}$  kao prelaz će se izdvojiti skoro 90% materijala. Na ovaj način je moguće na osnovu granulacione krive pratiti usitnjavanje u mlinu jer se svaka promena parametara usitnjavanja ili svojstava usitnjavane pšenice odražava na stepen usitnjenosti i raspodelu veličine čestica mliva, a time i na promenu oblika granulacione krive. Uočene

promene moguće je korigovati (jedan od načina je da se prinos izvoda na krupačima održi na zadatom nivou) čime se sprečavaju oscilacije opterećenja opreme, a što utiče na veću stabilnost svih etapa tehnološkog postupka. Na taj način, sprečavaju se i negativni efekti neuravnoteženog rada mlina na kapacitet, prinos i kvalitet brašna i potrošnju energije u mlinu [21].

Druga grupa pokazatelja efektivnosti postupka usitnjavanja – kvalitativni pokazatelji – baziraju se na razlikama koje postoje u hemijskom sastavu osnovnih anatomskih delova zrna i treba da ukažu na efikasnost separacije. Kao osnovni kvalitativni pokazatelj koristi se sadržaj pepela u dobijenim međuproizvodima i u brašnu. Određivanjem sadržaja pepela stiče se uvid u stepen razdvajanja endosperma od omotača, a na osnovu velike razlike koje postoji između njih, po pitanju sadržaja mineralnih materija [21]. Informacija o sadržaju pepela u brašnu dodatno je korisna u našoj zemlji, jer se tipizacija brašna prema važećoj regulativi obavlja upravo prema sadržaju pepela. Pored pepela, celuloza je neravnomerno raspoređena po anatomskim delovima pa bi mogla da bude pogodan pokazatelj efektivnosti separacije. Međutim, određivanje celuloze je zahtevnije u odnosu na analizu pepela jer je dugotrajnije, skuplje i manje reproduktivno. Pored pomenutih, pojedini autori su predložili i druge metode za ocenu stepena razdvajanja osnovnih anatomskih delova, a koje su se bazirale na praćenju sadržaja proteina, pentozana, masti i masnih kiselina ili sadržaju fenolnih kiselina u međuproizvodima mlevenja i brašnu [37,99–106]. Ipak, kako je reč o dugotrajnim i relativno skupim analizama, pomenute metode nisu našle primenu u kontroli postupka na industrijskom nivou.

Stoga se, kao što je pomenuto, kao najčešće korišćeni kvalitativni pokazatelj efektivnosti mlevenja koristi pepeo, a u praksi se najčešće izražava u formi kumulativne krive pepela koja prikazuje zavisnost između sadržaja pepela i ukupnog izbrašnjavanja (Slika 2.7). Kumulativna kriva pepela formira se na osnovu prinosa pasažnih brašna koja se izdvajaju u tehnološkom postupku i sadržaja pepela u tim brašnima.



**Slika 2.7.** Kumulativna kriva pepela

Kumulativna kriva pepela služi da se pomoću nje odredi sadržaj pepela u brašnu za različite nivoe izbrašnjavanja. Na konkretnom primeru možemo utvrditi da će, za postavljeni tehnološki postupak, ukoliko želimo da prinos brašna bude 66%, sadržaj pepela u tom brašnu biti 0,55%. Kriva koja ne raste značajnije pri nižem nivou izbrašnjavanja i koja ispod sebe formira minimalnu površinu ukazuje na dobre rezultate mlevenja [19].

Kumulativne krive pepela mogu se pokazati i uporedo na istom grafiku, kako bi se poredile mlevne karakteristike različitih partija pšenice. Viši sadržaj pepela pri istom nivou izbrašnjavanja ukazuje na lošiju meljivost određene pšenice. Analogno tome, pri istom sadržaju pepela, pšenica sa boljom meljivošću daće veći prinos u brašnu. Na osnovu kumulativne krive pepela moguće je za svaki nivo izbrašnjavanja odrediti strukturu i prinos pojedinih tipskih brašna [21,107].

Kao što je prethodno pomenuto, energija potrebna za postupak usitnjavanja varira u zavisnosti od željenog stepena usitnjenosti, strukturno-mehaničkih osobina usitnjavanog materijala i parametara pri kojim uređaji rade. Pokazatelji koji se odnose na ovaj aspekt usitnjavanja nazivaju se energetske pokazatelji, i u industriji se koriste kao pomoćni indikatori. Najčešće je u upotrebi specifični utrošak energije, koja se definiše kao utrošena količina energije za usitnjavanje određene mase polaznog materijala ili, što je sa praktičnog stanovišta možda još značajnije, količina utrošene energije spram jedinice mase dobijenog brašna [72].

## 2.4 PRIMENA MATEMATIČKIH MODELA U KONTROLI POSTUPKA USITNJAVANJA

Kao što je već napomenuto, efektivnost operacije usitnjavanja uslovljena je svojstvima materijala koji se usitjava (fizičko-hemijske i strukturno-mehaničke osobine) i parametrima pri kojima se operacija usitnjavanja odvija. Stoga bi se pod kontrolom postupka usitnjavanja podrazumevala kontrola uticaja koja svojstva usitnjavanog materijala i parametri usitnjavanja imaju na kvalitativne, kvantitativne i energetske pokazatelje efekata usitnjavanja. Različiti matematički modeli primenjeni su u pokušaju da se izvrši detaljna analiza i adekvatno opiše postupak usitnjavanja. Kako je tema ove disertacije upotreba matematičkih modela za kontrolisanje efekata usitnjavanja u postupku mlevenja pšenice, u ovom poglavlju biće dat pregled najčešće korišćenih modela.

### 2.4.1 Teorijski principi primene matičnih jednačina za predviđanje efekata usitnjavanja

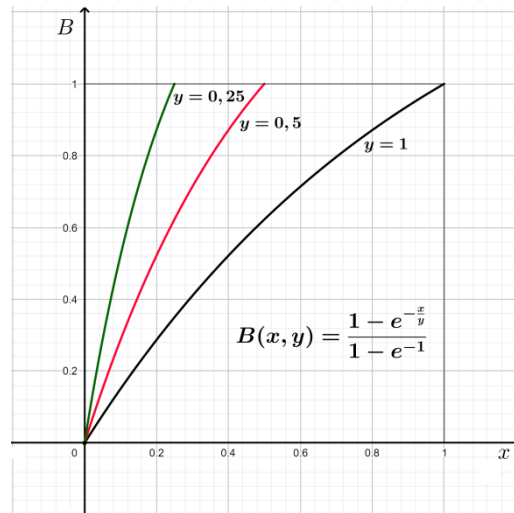
#### 2.4.1.1 Jednačina usitnjavanja

Mnogi autori pokušali su da definišu funkciju koja bi mogla da na odgovarajući način opiše promenu raspodele veličina čestica materijala tokom usitnjavanja. U preglednom radu Austin [108] je sumirao do tada predložene koncepte i uvideo da, iako su razvijani nezavisno jedan od drugih, predstavljaju varijacije sličnog pristupa. Osnovne ideje koje su pratile razvoj funkcije usitnjavanja su:

1. Ideja o principu selekcije, prema kojoj se deo čestica polaznog materijala usitjava, a deo ne; funkcija usitnjavanja odnosi se samo na čestice koje se usitnjavaju [109] i funkcija raspodele teži log-normal raspodeli što je u skladu sa pionirskim radom Kolmogorova [110];
2. Ideja da se usitnjavanje vrši po zakonu prvog reda [111] – brzina nestajanja čestica iz nekog uskog intervala je veličina proporcionalna masi čestica prisutnih u tom intervalu veličina;
3. Ideja o mogućnosti normalizacije funkcije usitnjavanja [112,113], prema kojoj je ona jednaka:

$$B(x, y) = \frac{1 - e^{-\frac{x}{y}}}{1 - e^{-1}}, 0 < x \leq y, \quad (2.8)$$

gde je  $B(x, y)$  kumulativna funkcija usitnjavanja kojom se definiše udeo čestica manjih od neke dimenzije  $x$  koje su nastale usitnjavanjem polazne čestice dimenzije  $y$  (Slika 2.8); Broadbent i Callcott su, kao i Sedlatschek i Bass, u jednačinu usitnjavanja uključili i Epsteinovu funkciju selekcije.



**Slika 2.8.** Normalizovana funkcija usitnjavanja Broadbent-a i Callcott-a [113]

Uzimajući u obzir navedene ideje, Austin je predložio sledeću integralnu jednačinu usitnjavanja:

$$P(x) = F(x) + \int_{D=x}^{x_{max}} S(D)B(x, D)\rho_1(D)dD. \quad (2.9)$$

Raspodela veličina čestica polaznog materijala predstavljena je sa  $\rho_1(D)$ , dok je sa  $P(x)$  označena masa čestica dobijenih usitnjavanjem, a čije su dimenzije manje od  $x$ .  $F(x)$  predstavlja masu čestica manjih od  $x$  koje se nalaze u početnom uzorku, a integralom je definisana masa čestica mliva sa veličinom manjom od  $x$  koje nastaju usled usitnjavanja. Funkcija selekcije označena je sa  $S(D)$ , a  $B(x, D)$  označava kumulativnu funkciju usitnjavanja. Njome se određuje udeo čestica mliva nastalih usitnjavanjem čestica veličine  $D$ , a koje su manje od neke veličine  $x$ .

Navedene koncepte, Campbell i Webb [73] su objedinili u opštu formulu masene distribucije, prema kojoj je:

masa dela ili frakcije izlaznog materijala u nekom intervalu veličina čestica =  
masa čestica u datom intervalu veličina nastalih usitnjavanjem krupnijih čestica +  
masa čestica u datom intervalu veličina koje su bile prisutne u polaznom uzorku pre  
usitnjavanja –  
masa čestica koje su bile prisutne u polaznom uzorku u datom intervalu veličina, ali  
su u postupku usitnjavanja postale čestice van datog intervala veličina.

Jednačinu usitnjavanja koja treba da poveže raspodele veličina čestica ulazne i izlazne frakcije definisali su na sledeći način:



$$\rho_2(x) = \int_{D=x}^{D=\infty} \rho(x, D)\rho_1(D)dD. \quad (2.10)$$

U navedenoj jednačini  $\rho_1(D)$  i  $\rho_2(x)$ , označavaju raspodele veličina čestica polaznog i usitnjenog materijala, respektivno. One predstavljaju masene distribucije – raspodela veličina čestica definiše se kao raspodela masenih udela čestica određenog intervala veličina u ukupnoj masi čestica. Sa  $\rho(x, D)$  data je funkcija usitnjavanja, odnosno verovatnoća da od početne čestice veličine  $D$  nastane izlazna čestica veličine  $x$ . Autori su uveli i pretpostavku da tokom operacije usitnjavanja može da dođe samo do redukcije veličine čestica, a ne i do njihovog spajanja.

Međutim, u kasnijim istraživanjima [63,114] granica integraljenja je ispravljena sa  $D=x$  na  $D=0$ , sa obzirom na činjenicu da je moguće da se zrno izloženo silama sabijanja u procesu usitnjavanja usitni na takav način da nastanu presovani delovi omotača čije će dimenzije biti veće od veličine zrna koje se na početku usitjava [43,62]. Pored toga, autori napominju da se veličina zrna koje se usitjava ( $D$ ) i veličina usitnjene čestice ( $x$ ) određuju na različite načine, te da stoga nisu uporedive.

Predložena jednačina može da se dobije diferenciranjem jednačine (2.10) u odnosu na  $x$ . Tada će funkcija usitnjavanja  $\rho(x, D)$  u sebi sadržati i funkciju odabira:

$$\rho(x, D) = S(D) \frac{d\{B(x, D)\}}{dx}. \quad (2.11)$$

Kao i Austin [108], Campbell i Webb dovode u pitanje potrebu za korišćenjem funkcije odabira. Pored toga što komplikuje proračun, u slučajevima usitnjavanja mlinskim valjcima na prolazištu prvog krupljenja čini se nepotrebnim uvrštavanje funkcije odabira, jer se sva zrna usitne prilikom prolaska između valjaka. Međutim, autori navode i da u slučajevima usitnjavanja nekog drugog materijala na mlinskim valjcima treba pažljivo razmotriti da li je uključivanje funkcije odabira neophodno da bi se pravilno definisala funkcija usitnjavanja [73].

Za potpuno definisanje funkcije usitnjavanja i modelovanje postupka usitnjavanja izdvajaju se dva različita pristupa.

Prvim se promena raspodele veličina čestica prati kontinualno sa vremenom (eng. *time dependent*). Materijalni bilans se u ovom pristupu izražava u diferencijalnoj formi. Metod kojim se kontinualno prati evolucija, odnosno promena raspodele veličina čestica ulaza i izlaza je metod balansa populacije (eng. *Population Balance Method - PBM*). Pored već pomenutih Epstein-a [109] i Austin-a [108] mnogi autori su koristili PBM za definisanje modela kojim bi se na adekvatan način opisao postupak usitnjavanja čestica različitog materijala [17,115–120]. Iako uz veliku preciznost i na adekvatan način može da predstavi promenu veličine čestica sa vremenom, pomenuti metod ima nedostatak praktične prirode. Njegovom upotrebom, podrazumeva se da se promena veličina čestica prati kontinualno

tokom vremena, što bi iziskivalo uzorkovanje tokom celog postupka usitnjavanja, što je često praktično neizvodljivo.

Stoga se često pribegava alternativnom pristupu koji operaciju usitnjavanja posmatra nezavisno od vremena (eng. *time independent*), odnosno kao jedan događaj. U ovom pristupu se promena veličina čestica ne prati kontinualno, nego se definiše veza između početnog i krajnjeg stanja. Pomenuti pristup je poznat i kao diskretan linearan model balansa populacije (eng. *discrete linear PBM*). Predložili su ga Broadbent i Callcott [112,113,121] i izrazili postupak usitnjavanja u formi matrice jednačine. Stoga se ovaj koncept naziva i matricama usitnjavanja (eng. *breakage matrix approach*). Njegova osnovna prednost je u olakšanom i jednostavnijem prikupljanju eksperimentalnih podataka. Predložena metoda bila je predmet istraživanja mnogih autora [2,42,73,112,113,121] i pokazala se pogodnom za modelovanje postupaka usitnjavanja na mlinovima različitog tipa.

Obzirom na navedene prednosti praktične prirode, tema ove disertacije su upravo matrice usitnjavanja i mogućnost njihove primene u kontroli efekata usitnjavanja. Stoga će se u narednim poglavljima napraviti pregled vezan za razvoj i različite primene koncepta matrica usitnjavanja za opisivanje postupaka usitnjavanja, koji je neophodan za razumevanje i realizaciju originalnog dela disertacije.

#### 2.4.1.2 Definisane pojma i način formiranja matrice usitnjavanja

Kada se operacija usitnjavanja posmatra kao jedan događaj vezu između raspodela veličina čestica (eng. *particle size distribution – PSD*) pre i nakon usitnjavanja moguće je izraziti u formi matrice jednačine. U matematičkom zapisu, pomenuto ima sledeći oblik:

$$B \cdot f = o, \quad (2.12)$$

odnosno:

$$\begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \cdots & b_{1n} \\ b_{21} & b_{22} & \cdots & b_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{m1} & b_{m2} & \cdots & b_{mn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \vdots \\ f_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} o_1 \\ o_2 \\ \vdots \\ o_m \end{bmatrix}. \quad (2.13)$$

U tom slučaju raspodela veličina čestica materijala za usitnjavanje predstavljena je vektor kolonom označenom sa  $f$  (eng. *feed*). Raspodela veličina čestica materijala koji se dobije usitnjavanjem (mliva) predstavljena je vektor kolonom obeleženom sa  $o$  (eng. *output*). Ove raspodele povezane su po principu pravila množenja matrica, a veza je predstavljena matricom usitnjavanja  $B$  (eng. *breakage matrix*).

Fizički, elementi vektor kolona  $f$  i  $o$  predstavljaju masene udele pojedinačnih frakcija usitnjanog materijala i mliva. Kolone matrice usitnjavanja  $B$  opisuju način na koji se tokom postupka usitnjavanja svaka od frakcija usitnjanog materijala  $f$  raspoređuje u frakcije

usitnjenog materijala  $o$ . Preciznije, član matrice usitnjavanja  $b_{ij}$  određuje maseni udeo frakcije ulaznog materijala  $f_j$  koji usitnjavanjem dospeva u izlaznu frakciju  $o_i$ , čime njen maseni udeo ukupno iznosi:

$$o_i = \sum_{j=1}^n b_{ij} \cdot f_j, \quad 1 \leq i \leq m. \quad (2.14)$$

Sa obzirom da svi opisani članovi matrične jednačine predstavljaju masene udele, njihov zbir je jednak jedinici. Stoga, prilikom korišćenja matričnih jednačina za opisivanje postupka usitnjavanja važe uslovi:

$$\sum_{j=1}^n f_j = 1, \quad \sum_{i=1}^m o_i = 1, \quad \sum_{i=1}^m b_{ij} = 1, \quad j \in \{1, 2, \dots, n\}. \quad (2.15)$$

Elementi matrice usitnjavanja dobijaju se eksperimentalno, gde je princip određivanja opisan u nastavku.

Prvobitno se materijal za usitnjavanje analizom sejanja razdvoji na  $n$  frakcija. Određivanjem masenog udela svake frakcije u polaznom uzorku dobijaju se elementi ulaznog vektora  $f$ . Potom se usitni najkrupnija frakcija ulaza i dobijeno mlivo prosejavanjem razdvoji na  $m$  frakcija. Određivanjem masenog udela tih frakcija u odnosu na usitnjavanu frakciju, dobijaju se članovi prve kolone matrice usitnjavanja. Frakcije se u kolonama matrice obično poređaju od krupnijih prema sitnijim. Postupak se ponavlja za preostale ulazne frakcije i formiraju se kolone matrice usitnjavanja. Pridruživanjem odgovarajućih frakcija izlaza i određivanjem njihovog masenog udela u odnosu na ukupnu masu izlaza dobijaju se elementi vektor kolone  $o$ .

Primetimo da je jednačinom (2.13) prikazan postupak usitnjavanja gde broj ulaznih i izlaznih frakcija ne mora da bude jednak, kao i da je ostavljena mogućnost za nastajanje krupnijih čestica od polaznih pri usitnjavanju. Sa tim u vezi, dalje će se diskutovati o formatu i tipovima matrice usitnjavanja, a koji su određeni upravo brojem ulaznih i izlaznih frakcija, kao i dimenzijama usitnjavanog i usitnjenog materijala.

### 2.4.1.3 Kvadratne matrice usitnjavanja

Matrične jednačine u cilju povezivanja rapodele veličina čestica pre i nakon usitnjavanja prvi su upotrebili Broadbent i Callcott [112,113,121,122]. Autori su u svojim istraživanjima posmatrali efekte usitnjavanja uglja na konusnim mlinovima.

Za frakcionisanje materijala pre i nakon usitnjavanja, autori su koristili istovetan slog sita i materijal su razdvajali na jednak broj frakcija. Stoga su matrice usitnjavanja bile kvadratnog oblika. Pored toga, autori su pretpostavili da do aglomeracije čestica ne može da dođe, odnosno da čestice iz određenog opsega veličina usitnjavanjem daju čestice koje pripadaju

takvom ili opsegu manjih veličina. Zbog toga je formirana matrica usitnjavanja imala oblik donje trougaone matrice (elementi iznad dijagonale jednaki su nuli), te je postupak usitnjavanja dat sledećom matricnom jednačinom:

$$\begin{bmatrix} b_{11} & 0 & \cdots & 0 \\ b_{21} & b_{22} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{n1} & b_{n2} & \cdots & b_{nn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \vdots \\ f_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} o_1 \\ o_2 \\ \vdots \\ o_n \end{bmatrix}, \quad (2.16)$$

koja, u matematičkom smislu, predstavlja značajno uprošćenje jednačine (2.13). Navedena matrica može da bude upotrebljena za predviđanje raspodele veličina čestica izlaza, za poznatu raspodelu veličina čestica ulaza. Pored toga, definisana je i matricna jednačina za usitnjavanje u više koraka:

$$B^k \cdot f = o_k, \quad (2.17)$$

gde  $k$  označava korak usitnjavanja. Pod pretpostavkom da je kvadratna matrica  $B$  regularna, moguće je odrediti inverznu matricu  $B^{-1}$  na osnovu koje je jednačinom:

$$B^{-1} \cdot o = f, \quad (2.18)$$

moguće odrediti raspodelu veličina čestica ulaznog materijala, čijim će se usitnjavanjem dobiti unapred definisana raspodela veličina čestica mliva. Tada se ulazni vektor  $f$  može izraziti iz povratne (rekurentne) veze:

$$f_i = \frac{o_i - \sum_{j=1}^{i-1} b_{ij} \cdot f_j}{b_{ii}}, 2 \leq i \leq n-1, f_1 = \frac{o_1}{b_{11}}, f_n = 1 - \sum_{i=1}^{n-1} f_i. \quad (2.19)$$

Dakle, sa (2.18) i (2.19) je data mogućnost zadavanja željene raspodele veličine čestica na izlazu. Međutim, obzirom na prirodu datih jednačina, a posebno na uslov (2.15) postavlja se pitanje da li je moguće potpuno proizvoljno zadati vektor  $o$ ? Ovo pitanje, kao i kasnije uvođenje dopustive oblasti za odabir frakcija izlaza detaljno je sagledan u radovima Fišteša i saradnika [123,124]. Neka je  $m_i = \min_{1 \leq j \leq i} \{b_{ij}\}$  i  $M_i = \max_{1 \leq j \leq i} \{b_{ij}\}$ ,  $1 \leq i \leq n$ . Tada iz jednačine (2.14) sledi:

$$m_i \cdot (f_1 + f_2 + \cdots + f_n) \leq o_i \leq M_i \cdot (f_1 + f_2 + \cdots + f_n), 1 \leq i \leq n, \quad (2.20)$$

i dalje preko prvog uslova navedenog u (2.15) dobijaju se ograničenja:

$$m_i \leq o_i \leq M_i, 1 \leq i \leq n. \quad (2.21)$$

Naravno, pri zadavanju vektora  $o$  mora se voditi računa i o drugom uslovu iz (2.15), odnosno izlaze birati tako da njihova suma ne bude veća od 1. Uslovom (2.21) definisano je pravilo, koje je ujedno i ograničenje prilikom odabira željene raspodele veličina čestica na izlazu.

Upotrebom donje trougaone matrice umnogome je olakšan proračun, ali je značajno umanjena opštost metode. Prevedeno jer je u praksi broj ulaznih i izlaznih frakcija u postupku usitnjavanja uglavnom različit i jer se sita sa istovetnim veličinama otvora retko koriste za određivanje raspodele veličine čestica polaznog i izlaznog materijala iz postupka usitnjavanja.

Ipak, navedena matrica usitnjavanja pokazala se pogodnom za opisivanje operacije usitnjavanja u slučajevima kada je stepen usitnjavanja mali ili kada je usitnjavanje sporedna ili neželjena posledica neke druge operacije. Baxter i saradnici [2] uspešno su je iskoristili za modelovanje usitnjavanja, odnosno delimične degradacije čestica do koje dolazi tokom transporta (pneumatskog) materijala.

Za dalji razvoj matičnog pristupa u modelovanju postupka usitnjavanja i njegovo kvalitativno unapređenje presudan uticaj imala su istraživanja Campbell-a i saradnika [8,73]. Izučavajući fenomene usitnjavanja na primerima mlevenja pšenice uspešni su da definišu matricu usitnjavanja opštijeg karaktera koja je umesto kvadratne postala matrica pravougaonog oblika.

#### 2.4.1.4 Pravougaona matrica usitnjavanja

Campbell i Webb [73] posmatrali su slučaj usitnjavanja pšeničnog zrna na mlinskim valjcima. Autori su pretpostavili da se prilikom prolaska kroz mlevni prostor valjka sva zrna pšenice usitne. Takođe, izvršili su korekciju u odnosu na Broadbent i Callott-a, i koristili su sita sa različitim veličinom otvora, kao i različit broj sita u slogu za fracionisanje ulaznog materijala i dobijenog mliva. Koristeći navedene principe, autori su definisali sledeću matricu usitnjavanja za povezivanje raspodela veličina čestica ulaza i izlaza:

$$\begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \cdots & b_{1n} \\ b_{21} & b_{22} & \cdots & b_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{m1} & b_{m2} & \cdots & b_{mn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \vdots \\ f_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} o_1 \\ o_2 \\ \vdots \\ o_m \end{bmatrix}. \quad (2.22)$$

Data matrica, ranije navedena u (2.13), pokazala se efikasnom za predviđanje raspodele veličina čestica mliva dobijenog usitnjavanjem na prvom prolazištu krupljenja [73]. Formirana matrica pretpostavlja da nema interakcija između čestica, odnosno da će se zrna usitnjavati na isti način bez obzira na to da li se nalaze u monodisperznom ili polidisperznom sistemu.

Još jedna suštinska razlika i unapređenje koje je ostvareno je da autori nisu postavili gornju granicu veličine kako za ulazne čestice, tako ni za mlivo. Sa praktične strane ovo je značajan pomak, obzirom da tokom postupka usitnjavanja može da dođe i do povećavanja dimenzija određenih čestica koje se usitnjavaju. Primer su mekinjaste čestice pšeničnog zrna koje pod

uticajem sila deformacije sabijanja mogu da se ispresuju i iz mlevnog prostora izađu većih dimenzija nego što su bile [125].

Pored toga, autori su pokazali i da elementi formirane matrice usitnjavanja podeljeni sa odgovarajućom širinom intervala krupnoće ulazne frakcije, dobro aproksimiraju funkciju usitnjavanja. Campbell i Webb [73] detaljno su izveli aproksimaciju neprekidnog sa diskretnim slučajem. Posmatran je član matrice usitnjavanja  $b_{ij}$  koji treba da pokaže koji se udeo ulazne frakcije  $f_j$  usitnjava do veličine izlazne frakcije  $o_i$ .

Neka je  $\rho_1(D)$  definisana funkcija gustine raspodele veličina čestica ulaznog materijala čiji je prečnik označen sa  $D$ . Tada će frakcija  $f_j$  čiji se prečnik nalazi u intervalu  $[D_{j-1}, D_j]$  biti jednaka:

$$f_j = \int_{D_j}^{D_{j-1}} \rho_1(D) dD \approx \rho_1(D_j^*) \cdot (D_{j-1} - D_j), \quad 1 \leq j \leq n, \quad (2.23)$$

za neko  $D_j^*$  koji pripada intervalu od  $D_{j-1}$  do  $D_j$ . Ako se sa  $x$  označi veličina otvora na sitima kojima se određuje veličina čestica izlaznog materijala, masa frakcije u opsegu od  $x_i$  do  $x_{i-1}$  koja zaostaje na donjem situ ( $i$ ) moći će da se odredi na sledeći način:

$$o_i = \int_{x_i}^{x_{i-1}} \rho_2(x) dx, \quad 1 \leq i \leq m, \quad (2.24)$$

iz čega dalje može da se izvede diskretan oblik jednakosti za (2.24):

$$o_i = \sum_{j=n}^1 \frac{f_j}{D_{j-1} - D_j} \int_{x_i}^{x_{i-1}} \int_{D_j}^{D_{j-1}} \rho(x_i^*, D_j^*) dD dx, \quad (2.25)$$

gde je:

$$\rho(x_i^*, D_j^*) \approx \frac{b_{ij}}{x_{i-1} - x_i}, \quad (2.26)$$

a  $x_i^*$  i  $D_j^*$  sredine intervala  $x_i^* = \frac{x_{i-1} + x_i}{2}$ ,  $D_j^* = \frac{D_{j-1} + D_j}{2}$ .

U nastavku svog istraživanja, Campbell i saradnici bavili su se kontinualnim oblikom funkcije usitnjavanja za opisivanje raspodele veličina čestica u postupcima usitnjavanja pšenice.

Campbell i saradnici [8] ispitivali su funkciju usitnjavanja na prvom prolazištu krupljenja za dve različite sorte pšenice. Razmatrali su kako odnos veličine usitnjavanih čestica i razmak između valjaka utiče na usitnjavanje. Pokazalo se da se različite sorte pšenice usitnjavaju na

različite načine, te da se jedna, normalizovana funkcija usitnjavanja ne može upotrebiti da bi se opisao način usitnjavanja za različite materijale koji se usitnjavaju. Fang i Campbell [63,114] su u svojim istraživanjima definisali funkcije usitnjavanja koje su pokazale visoku mogućnost predviđanja raspodele veličine čestica nakon usitnjavanja na prvom prolazištu krupljenja. U okviru prvog istraživanja, usitnjavali su dve sorte pšenice (meku i durum pšenicu), a promenljivi parametar bio je i međusobni položaj žlebova, koji je variran u četiri osnovna položaja (L/L, O/O, O/L i L/O). U okviru drugog istraživanja autori su ispitivali funkciju za predviđanje raspodele veličine čestica nakon usitnjavanja, a na osnovu sadržaja vode u zrnima. Funkcija se pokazala pogodnom za predviđanje raspodele veličine čestica nakon usitnjavanja, a poklapanje vrednosti raspodele veličine čestica nakon usitnjavanja dobijene na osnovu modela i nezavisnim eksperimentima potvrđene su visokim koeficijentom determinacije ( $R^2 \geq 0,99$ ). Daljim istraživanjima Campbell i saradnici [64,126,127] su proširili funkciju usitnjavanja tako da uključuje i parametre kao što su tvrdoća, oblik i veličina zrna, a za opisivanje usitnjavanja korišćena je dupla normalizovana Kumarasvamijeva funkcija usitnjavanja (eng. *Double Normalized Kumaraswamy Breakage Function*).

Pored Campbell-a i saradnika, i drugi autori su ispitivali mogućnosti primene funkcije usitnjavanja. Funkcijom usitnjavanja u kumulativnom obliku, a na primerima mlevenja pšenice bavili su se i drugi autori [128–131]. Fuh i saradnici [132] primenili su Kumarasvamijevu funkciju usitnjavanja za modelovanje usitnjavanja na prvom prolazištu krupljenja, a posmatran je uticaj razmaka između valjaka, oblika zrna i sadržaja vode u zrnu. U preglednom radu Lyu-a i saradnika [133] sagledan je razvoj metoda koje su se koristile za modelovanje postupaka usitnjavanja, sa posebnim poglavljem posvećenim kumulativnoj funkciji usitnjavanja primenjenim na primerima mlevenja pšenice. Međutim, kako je tema ove disertacije usmerena na matrice usitnjavanja, ova istraživanja se neće detaljnije razmatrati.

U radu u kom su definisali pravougaonu matricu usitnjavanja [73], Campbell i Webb su predložili i njene dodatne namene. Oni su napomenuli da bi matrica usitnjavanja mogla da se upotrebi i za određivanje distribucije pojedinih anatomskih delova ili hemijskih komponenata zrna u frakcije izlaznog mliva. Ideja je razvijena radom Fišteša i saradnika [42,134,135] koji su definisali matrice za predviđanje raspodele hemijskih komponenata u frakcijama mliva. Upravo ove matrice predstavljaju tematiku narednog poglavlja.

#### **2.4.1.5 Matrice usitnjavanja za predviđanje sadržaja hemijskih komponenti u frakcijama mliva**

Matrice usitnjavanja u svrhu predviđanja raspodele hemijskih komponenata u frakcijama izlaza upotreбили su Fišteš i saradnici [42,134,135], da bi predvideli raspodelu pepela i proteina u frakcijama mliva dobijenog usitnjavanjem pšenice. Osnovna pretpostavka autora bila je da će zrno istih svojstava pri istim uslovima usitnjavanja pored istovetne raspodele veličina čestica proizvesti i jednaku raspodelu hemijskih komponenti po dobijenim frakcijama mliva.

Na osnovu te pretpostavke i opšteg oblika matrične jednačine (2.13), važi da je:

$$P_j = \sum_{i=1}^m b_{ij} \cdot p_{ij}, 1 \leq j \leq n, \quad (2.27)$$

gde je  $P_j$  sadžaj neke hemijske komponente u frakciji ulaza, a  $p_j$  sadržaj te komponente u frakciji izlaza. U tom slučaju se maseni udeo neke hemijske komponente u frakciji izlaza ( $Y$ ), izražen na ukupni sadržaj te komponente u polaznom materijala, može definisati na sledeći način:

$$Y_{ij} = \frac{b_{ij} \cdot p_{ij}}{P_j}, 1 \leq i \leq m, 1 \leq j \leq n. \quad (2.28)$$

Sa  $Y_{ij}$  označeni su fiksni elementi matrice za predviđanje sadržaja hemijskih komponenti u frakcijama mliva ( $p_i$ ). Kako elementi  $Y_{ij}$  predstavljaju masene udele neke komponente, važi:

$$\sum_{i=1}^m Y_{ij} = 1, 1 \leq j \leq n. \quad (2.29)$$

Sadržaj neke hemijske komponente u frakciji mliva zavisiće od prinosa te frakcije  $o_i$ , od raspodele veličina čestica ulaza  $f_i$  i od sadržaja odgovarajuće hemijske komponente u njima, što je označeno sa  $P_j$ . Kada se sve navedeno uzme u obzir, opšti oblik matrice za predviđanje sadržaja hemijske komponente u frakcijama izlaza je sledeći:

$$\begin{bmatrix} \frac{Y_{11}}{o_1} & \frac{Y_{12}}{o_1} & \dots & \frac{Y_{1n}}{o_1} \\ \frac{Y_{21}}{o_2} & \frac{Y_{22}}{o_2} & \dots & \frac{Y_{2n}}{o_2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{Y_{m1}}{o_m} & \frac{Y_{m2}}{o_m} & \dots & \frac{Y_{mn}}{o_m} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} f_1 \cdot P_1 \\ f_2 \cdot P_2 \\ \vdots \\ f_n \cdot P_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ \vdots \\ p_m \end{bmatrix}. \quad (2.30)$$

Primenjivost predloženog koncepta autori su potvrdili u svojim istraživanjima [42]. Autori su posmatrali prvo prolazište krupljenja u postupku mlevenja pšenice i pratili su distribuciju sadržaja pepela i proteina u frakcijama mliva. Koristeći predloženi matični pristup, uspeali su da za definisana svojstva ulaznog materijala (raspodela veličina čestica i sadržaj pepela i proteina u njima) predvide raspodelu veličina čestica i sadržaj pepela i proteina u frakcijama izlaza. Poklapanje između eksperimentalnih i računskih rezultata bilo je veće od 95%.

Na osnovu predloženih matrica za predviđanje raspodele hemijskih komponentata u frakcije mliva, Galindez-Najera i saradnici [136] su definisali kontinualnu jednačinu za predviđanje efekata usitnjavanja na prvom prolazištu krupljenja. Autori su pokazali da je upotrebom predložene jednačine moguće simultano predviđanje raspodele veličina čestica usitnjenog materijala i raspodele anatomskih delova pšeničnog zrna po frakcijama mliva.



### 2.4.1.6 Povratna matrica usitnjavanja

U prethodnim poglavljima predstavljene su matrice usitnjavanja za predviđanje karakteristika izlaznog materijala u slučajevima kada su poznati parametri usitnjavanja i svojstva ulazne sirovine. Matrice usitnjavanja se mogu koristiti i u drugom, inverznom obliku. Tada je pomoću njih moguće odrediti raspodelu veličina čestica ulaznog materijala čijim bi se usitnjavanjem, pri definisanim parametrima, dobilo mlivo željene, unapred zadate raspodele veličina čestica.

Fišteš i saradnici [123] su sveobuhvatno razmatrali mogućnost da se za definisanu matricu usitnjavanja odredi raspodela čestica na ulazu koja će dati željeni izlaz. Korišćena je pravougaona matrica usitnjavanja, a kako su se primeri odnosili na prolazište prvog krupljenja pšenice, u obzir nije uzeta funkcija odabira.

U cilju definisanja inverzne matrice, pomoću koje bi mogla da se odredi raspodela veličina čestica ulaznog materijala – vektor  $f$  za željenu raspodelu veličina čestica izlaznog materijala – vektor  $o$ , korišćena je standardan Gausov metod eliminacije. Matrična jednačina (2.13) napisana kao sistem linearnih jednačina ima sledeći oblik:

$$\begin{aligned} b_{11}f_1 + b_{12}f_2 + \dots + b_{1n}f_n &= o_1 \\ b_{21}f_1 + b_{22}f_2 + \dots + b_{2n}f_n &= o_2 \\ &\dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \\ b_{m1}f_1 + b_{m2}f_2 + \dots + b_{mn}f_n &= o_m. \end{aligned} \tag{2.31}$$

Koristeći elementarne transformacije i uslov (2.15), sistem linearnih jednačina (2.31) dimenzije  $m \times n$  se svodi na sistem dimenzije  $(m - 1) \times (n - 1)$ :

$$\begin{aligned} c_{11}f_1 + c_{12}f_2 + \dots + c_{1n-1}f_{n-1} &= d_1 \\ c_{21}f_1 + c_{22}f_2 + \dots + c_{2n-1}f_{n-1} &= d_2 \\ &\dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \\ c_{m-11}f_1 + c_{m-12}f_2 + \dots + c_{m-1n-1}f_{n-1} &= d_{m-1}, \end{aligned} \tag{2.32}$$

gde je:

$$\begin{aligned} c_{ij} &= b_{ij} - b_{in}, i \in \{1, 2, \dots, m - 1\}, j \in \{1, 2, \dots, n - 1\} \\ d_i &= o_i - b_{in}, i \in \{1, 2, \dots, m - 1\}. \end{aligned} \tag{2.33}$$

U obliku matrične jednačine, navedeni sistem (2.32) je oblika:

$$C \cdot f = d, \tag{2.34}$$

odnosno:

$$\begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \cdots & c_{1n-1} \\ c_{21} & c_{22} & \cdots & c_{2n-1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{m-11} & c_{m-12} & \cdots & c_{m-1n-1} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \vdots \\ f_{n-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ \vdots \\ d_{m-1} \end{bmatrix}. \quad (2.35)$$

Pronalaženjem inverzne matrice za matricu usitnjavanja  $C$  (u slučaju kada  $C$  nije kvadratna, moguće je koristiti pseudoinverznu matricu), moguće je odrediti raspodelu veličina čestica ulaznog materijala (vektor  $f$ ), čijim će se usitnjavanjem dobiti željeni izlazni vektor  $o$  (raspodela veličina čestica mliva). Međutim, vrednost izlaznih frakcija vektora  $o$  ne mogu da se zadaju proizvoljno. Dozvoljene vrednosti određene su elementima matrice usitnjavanja u odgovarajućoj vrsti, odnosno moraju da se kreću u intervalu između minimalne i maksimalne vrednosti elemenata matrice u odgovarajućoj vrsti koji predstavljaju maseni udeo pojedinačne frakcije izlaza. Ukoliko se ne bi odabirale spram toga (uslov definisan sa (2.21)), proračunom bi se dobili rezultati za ulazni vektor koji su fizički neostvarivi (elementi vektora bili bi ili manji od nule ili veći od jedinice). Ovo ograničenje posledica je činjenice da se matrica usitnjavanja definiše za određne parametre usitnjavanja i da je konstantna tokom čitavog postupka.

Izučavajući povratni problem matrica usitnjavanja, autori su posmatrali tri različita slučaja, koje je diktirao broj frakcija na ulazu i izlazu iz postupka usitnjavanja:

- $n = m$ , odnosno broj frakcija na ulazu je jednak broju frakcija na izlazu; tada je  $C$  regularna kvadratna matrica čije su vrste linearno nezavisne, što je dovoljan uslov za postojanje jedinstvene inverzne matrice  $C^{-1}$ , na osnovu koje je moguće odrediti vektor  $f$ , za zadate  $n - 1$  frakcije izlaza, odnosno frakcije ulaza koje vode do željene raspodele na izlazu;
- $n > m$ , odnosno broj frakcija na ulazu je veći od broja frakcija na izlazu; tada je moguće zadati  $m - 1$  izlaznih frakcija i pored njih  $n - m$  frakcija ulaznog vektora, za koje je moguće pronaći jedinstveno rešenje frakcija ulaza;
- $n < m$ , odnosno broj frakcija na ulazu je manji od broja frakcija na izlazu; ovaj slučaj će detaljnije biti razmatran, kao najzanimljiviji slučaj posmatrano i sa matematičkog i sa tehnološkog aspekta.

Prilikom zadavanja vrednosti izlaza (masenih udela frakcija) moguće je odabrati  $n - 1$  frakciju, a poslednja frakcija dobija se iz uslova (2.15). Na osnovu zadatih izlaza dolazi se do  $n - 1$  frakcije ulaza, a preostala frakcija dobija se iz uslova (2.15). U slučaju da je prioritet prilikom zadavanja upravo najfinija frakcija izlaza – frakcija  $o_n$  – autori navode da je redosled vrsta matrice moguće menjati. Tada se vrste matrice preraspodele tako da izlaz od značaja, koji želimo da biramo slobodno, ne bude poslednja,  $n$ -ta frakcija i dopuna u proračunu. Ova činjenica je naročito bitna za slučajeve kada je moguće birati znatno manji broj izlaznih frakcija, ili kada je određen redosled njihovog zadavanja.

### Slučaj ( $m > n$ )

U slučaju većeg broja izlaznih od ulaznih frakcija, slobodno se može birati  $n - 1$  izlaz, vodeći računa o uslovu (2.21) i o tome da njihova suma ne bude veća od 1. Kada se zadate izlazne frakcije, označene sa  $o_i$ ,  $i \in \{1, 2, \dots, n - 1\}$  uvrste u sistem linearnih nejednačina (2.32),  $n - 1$  jednačina se mogu napisati u obliku kvadratne matrice usitnjavanja  $C$ . Pronalaženjem inverzne matrice  $C^{-1}$  moguće je pronaći  $n - 1$  frakcija ulaznog vektora  $f_i$ ,  $i \in \{1, 2, \dots, n - 1\}$ . Preostale frakcije dobijaju se kao rezultat množenja matrica  $C \cdot f = d$ , kao i pravila da suma elemenata vektora  $f$  i  $o$  mora da bude jednaka jedinici.

Problem praktične primene navedenog metoda leži u tome što je nekada potrebno odrediti ulaznu raspodelu za unapred zadate sve izlazne frakcije ili za veći broj frakcija od dozvoljenih  $n - 1$ . Tada se sa predloženog – *preciznog pristupa* – prelazi na *aproksimativni pristup*. U aproksimativnom pristupu, moguće je zadati sve frakcije izlaza, a potom se nekom od numeričkih metoda linearne algebre rešava početni problem definisan matričnom jednačinom i dolazi se do rešenja koja će u nekom stepenu da zadovolje zahteve.

Konkretno, u [123] korišćena je metoda dekompozicije singularnih vrednosti (eng. Singular Value Decomposition – SVD), dok je u [124] razmatrana primena QR dekompozicije. Pored navedenih, u praksi često korišćenih i implementiranih u mnoge dostupne softvere, navedene su i mogućnosti primene nekih drugih metoda, kao što su LU dekompozicija, metod Holeskog, Gram-Šmitov postupak ortogonalizacije i druge.

Korišćenjem SVD i QR metode, autori su uspeli da dođu do raspodele veličina čestica ulaza koje bi dale zadovoljavajuću raspodelu veličina čestica izlaza, što je potvrđeno ocenom greške zasnovanoj na sumi kvadrata odstojanja. Međutim, problem sa metodama bio je fizičke prirode, jer je čest slučaj bio da se dobiju rešenja koja su ili veća od jedinice ili su negativna. Ovakva rešenja nisu imala smisla sa praktičnog aspekta, sa obzirom da frakcije ulaza predstavljaju masene udele, te da moraju da budu u opsegu od 0 do 1. Stoga je razmatrana i implementacija uslova nenegativnosti, čime jednačina  $B \cdot f = o$  postaje nenegativan problem najmanjih kvadrata (eng. Non-Negative Least Square method – NNLS) i posmatra se kao problem linearnog programiranja.

U tu svrhu, metoda se pokazala korisnom, ali je izbegavanje negativnih rešenja postignuto svođenjem frakcije ulaza koja je negativna na nulu. Ovakvo rešenje je takođe tehnološki neprihvatljivo, jer bi to impliciralo da se jedna ulazna frakcija gubi. Autori su zbog toga predložili semilogaritamsku funkciju koju je uveo Joneda [137]. Pristup je dao pozitivna rešenja, u opsegu između 0 i 1, bez svođenja neke frakcije na nulu, uz zadovoljavajuće slaganje sa željenim vrednostima frakcija na izlazu ( $R^2 = 0,9990$ ).

Takođe određena je i oblast iz koje se mogu izabrati željeni izlazi za koje je moguće doći do kombinacije ulaznih frakcija. Ova oblast definisana je kao *oblast dopustivih rešenja* [123,124], a pokazano je da je ona u potpunosti određena elementima matrice usitnjavanja. Određivanje oblasti dopustivih rešenja prikazano je u sledećem poglavlju kao jedan od obaveznih i najdelikatnijih zadataka u istraživanjima obuhvaćenim disertacijom.

#### 2.4.1.6.1 Određivanje oblasti dopustivih rešenja

Za matricu  $C$  datu u (2.32), definisana je inverzna matrica dimenzija  $(n-1) \times (n-1)$  i označena je sa  $G$ , odnosno  $G = C^{-1}$ . Raspodela ulaznog materijala koja vodi do željene raspodele veličina čestica na izlazu tada je definisana sledećom jednačinom:

$$\begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} & \cdots & g_{1n-1} \\ g_{21} & g_{22} & \cdots & g_{2n-1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ g_{n-11} & g_{n-12} & \cdots & g_{n-1n-1} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ \vdots \\ d_{n-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \vdots \\ f_{n-1} \end{bmatrix}. \quad (2.36)$$

Ako se, dalje, postavi sistem linearnih nejednčina:

$$f_i \geq 0, i \in \{1, 2, \dots, n-1\} \text{ i } \sum_{i=1}^{n-1} f_i \leq 1, \quad (2.37)$$

koji sugeriše da maseni udeli ulaznog materijala moraju da budu između vrednosti 0 i 1, nakon izračunavanja taj sistem postaje:

$$\sum_{j=1}^{n-1} g_{ij} \cdot o_j - \sum_{j=1}^{n-1} g_{ij} \cdot b_{jn} \geq 0, \quad i \in \{1, 2, \dots, n-1\}, \quad (2.38)$$

$$\sum_{j=1}^{n-1} \left( \sum_{i=1}^{n-1} g_{ij} \right) \cdot o_j + \sum_{j=1}^{n-1} \left( \sum_{i=1}^{n-1} g_{ij} \right) \cdot b_{jn} \leq 1.$$

Preko (2.38) problem određivanja skupa prihvatljivih rešenja postaje klasičan problem linearnog programiranja. Posmatrano geometrijski, rešenja nejednčina definisanih sa (2.38) su tačke unutar konveksnog poliedra koji je definisan sledećim hiperravnima:

$$h_i: \sum_{j=1}^{n-1} g_{ij} \cdot o_j = \sum_{j=1}^{n-1} g_{ij} \cdot b_{jn}, \quad i \in \{1, 2, \dots, n-1\}, \quad (2.39)$$

$$h_n: \sum_{j=1}^{n-1} \left( \sum_{i=1}^{n-1} g_{ij} \right) \cdot o_j = 1 - \sum_{j=1}^{n-1} \left( \sum_{i=1}^{n-1} g_{ij} \right) \cdot b_{jn},$$

gde su hiperravni potprostori koji imaju dimenzije uvek za jedan manje od početnog prostora (tačka za  $\mathbb{R}^2$ , prava za  $\mathbb{R}^3$ , ravan za  $\mathbb{R}^4$  i tako dalje). Kao veoma značajno treba istaći da su temena poliedra definisanog sa (2.39) determinisana kolonama matrice usitnjavanja:

$$V_j(b_{1j}, b_{2j}, \dots, b_{n-1j}), j \in \{1, 2, \dots, n\}, \quad (2.40)$$

odnosno određena su parametrima tehnološkog postupka usitnjavanja.

Oblasti definisane sa (2.39) i (2.40), predstavljaju oblasti dopustivih rešenja za izlazne frakcije mlevenja. Dakle, ukoliko odabrani izlazi pripadaju oblasti koja je definisana njima, moguće je pronaći ulaznu raspodelu koja će dati željenu raspodelu veličina čestica materijala na izlazu. Na primer, ukoliko je materijal na ulazu podeljen na tri frakcije, prostor u kom se nalaze potencijalna rešenja biće trougao ograničen pravama koje se dobijaju iz (2.39) i imaju sledeći oblik:

$$\begin{aligned} l_1: (b_{22} - b_{23}) \cdot o_1 + (b_{13} - b_{12}) \cdot o_2 &= b_{22} \cdot b_{13} - b_{12} \cdot b_{23}, \\ l_2: (b_{23} - b_{21}) \cdot o_1 + (b_{11} - b_{13}) \cdot o_2 &= b_{11} \cdot b_{23} - b_{21} \cdot b_{13}, \\ l_3: (b_{22} - b_{21}) \cdot o_1 + (b_{11} - b_{12}) \cdot o_2 &= b_{11} \cdot b_{22} - b_{12} \cdot b_{21}. \end{aligned} \quad (2.41)$$

Gde su temena definisanog trougla tačke određene elementima matrice usitnjavanja:

$$V_1(b_{11}, b_{21}), V_2(b_{12}, b_{22}), V_3(b_{13}, b_{23}).$$

#### *2.4.1.7 Prednosti i nedostaci koncepta matrica usitnjavanja*

Matrice usitnjavanja pokazale su se kao pogodna metoda za modelovanje postupka usitnjavanja. Postignuti su rezultati dobre preciznosti, a izračunavanje je olakšano u odnosu na integralni pristup. Suštinska prednost u odnosu na kontinualni pristup ostvarena je sa praktične strane, obzirom da je podatke potrebne za modelovanje znatno lakše pribaviti kada se usitnjavanje posmatra kao jedan događaj, u odnosu na kontinualni pristup, koji iziskuje kontinualno, unutar procesno uzimanje uzoraka.

Međutim, neistražena je mogućnost primene matrica usitnjavanja za kontrolu efekata usitnjavanja na većem broju uzastopnih prolazišta mlevenja. Takođe, ostalo je otvoreno pitanje da li se koncept matrica usitnjavanja za određivanje sadržaja hemijskih komponenata u frakcijama mliva može upotrebiti u reverzibilnom obliku. Preciznije, da li je moguće odrediti karakteristike materijala čijim bi se usitnjavanjem pri datim uslovima, uz željenu raspodelu veličine čestica mliva, postigla i željena raspodela hemijskih komponenti, odnosno željeni hemijski sastav frakcija mliva. Tematika ove disertacije biće usmerena na razmatranje ovih pitanja.

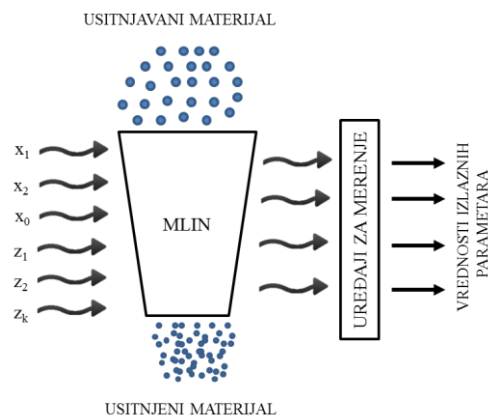
Sa druge strane, osnovni nedostatak metode matrica usitnjavanja je što se jednom definisana matrica usitnjavanja odnosi samo za parametre usitnjavanja pri kojima je definisana i za materijal koji odgovara strukturno-mehaničkim osobinama materijala za koji je matrica definisana. Stoga se matrice usitnjavanja ne mogu upotrebiti da bi se razmatrao uticaj koji parametri usitnjavanja imaju na efekte usitnjavanja. Zato će se u okviru ove disertacije

razmatrati i primena statističke metode odzivne površine. Ova metoda pokazala se pogodnom za evaluaciju pojedinačnih ili kombinovanih uticaja ulaznih faktora (u ovom slučaju parametara usitnjavanja) na izlazne faktore (u ovom slučaju pokazatelje efektivnosti usitnjavanja), kao i za optimizaciju različitih tehnoloških postupaka. Naredno poglavlje biće posvećeno pomenutoj statističkoj metodi.

## 2.4.2 Primena metode odzivne površine za analizu postupka mlevenja

### 2.4.2.1 Proces i optimizacija procesa

Postupak usitnjavanja, kao i drugi postupci kojima se neki ulazni materijal transformiše u izlazni uz mogućnost kontrole ulaznih i posmatranje (merenje) izlaznih karakteristika, uopšteno se može prikazati šematski (Slika 2.9).



**Slika 2.9.** Šematski prikaz postupka usitnjavanja

Na slici su sa  $x$  označeni parametri koji utiču na postupak usitnjavanja i mogu da se kontrolišu, dok su sa  $z$  označeni parametri koji utiču na postupak, a ne kontrolišu se. Ako se za primer eksperimenta uzme postupak usitnjavanja pšenice na prolazištu prvog krupljenja, pod usitnjavanim materijalom bi se podrazumevalo pšenično zrno. Faktori koji se kontrolišu bili bi razmak između valjaka, specifično opterećenje valjaka, prenosni odnos, brzina obrtanja valjaka, karakteristike radne površine valjka i drugi. Faktori koji se ne kontrolišu podeljeni su u dve grupe: u faktore koji se ne kontrolišu jer ih u datom postupku nije moguće kontrolisati i faktore koje je moguće kontrolisati, ali se ne kontrolišu jer je procena da nisu od velikog značaja za postupak. Za navedeni primer, kao faktor koji nije moguće kontrolisati može da se navede interakcija čestica u mlevnom prostoru. Usitnjeni materijal bi predstavljale frakcije pasaznog brašna i međuproizvoda mlevenja, a njihov prinos i hemijski sastav, potrošnja energije i drugo bi predstavljali izlazne parametre koji se određuju uređajima za merenje (Slika 2.9).

Bolje upoznavanje, te unapređenje bilo kog tehnološkog postupka i povećanje njegove efikasnosti, uz minimizaciju troškova veoma je važan zadatak. U te svrhe koristi se optimizacija [138], uz prethodno ispitane značajnosti uticaja ulaznih faktora na izlazne i određivanje modela koji ih matematički (funkcionalno) opisuje. Tradicionalan pristup analize

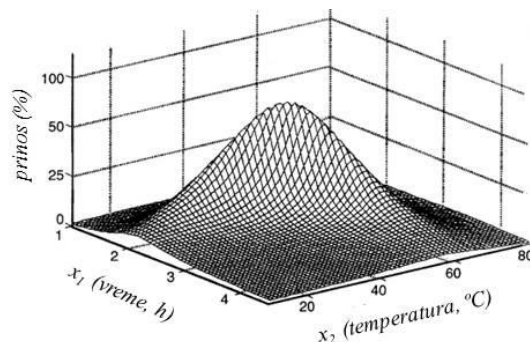
navedenog postupka usitnjavanja podrazumevao bi variranje jednog po jednog kontrolisanog faktora i utvrđivanje uticaja tih promena na izlaze. Takav pristup naziva se metod jednog faktora u vremenu (eng. *one factor at a time – OFAT*).

Ukoliko bi se, za navedeni primer usitnjavanja pšenice na prolazištu prvog krupljenja, kao kontrolisani faktori posmatrali razmak između valjaka, specifično opterećenje valjaka i prenosni odnos, uticaj faktora bi se ispitivao na sledeći način. Prvo bi se razmak između valjaka varirao na nekoliko nivoa, dok bi se ostali parametri držali fiksirani. Tako bi se uvidelo kako smanjenje ili povećanje razmaka između valjaka utiče na prinos frakcija, njihov sastav ili potrošnju energije potrebne za usitnjavanje. Međutim, na taj način ne bi se stekao uvid u kombinovani uticaj parametara na odzive. Na primer, povećanje specifičnog opterećenja potencijalno može da utiče na razmak između valjaka (veća količina materijala može da izazove razmicanje trupaca, a time i povećanje razmaka između valjaka) što bi se odrazilo na izlaze (efekte usitnjavanja). Stoga ispitivanje uticaja faktora po principu jedan po jedan daje nepotpunu sliku i onemogućava adekvatnu optimizaciju posmatranog postupka usitnjavanja. Pored toga, navedeni pristup iziskuje veliki broj eksperimenata i više vremena za izvođenje, što sve zajedno povećava troškove optimizacije.

U cilju prevazilaženja ograničenja OFAT pristupa, najčešće se koristi metoda planiranja eksperimenata (eng. *design of experiments – DoE*) u koju su implementirane metode multivarijantne statistike i numerički postupci neophodni za optimizaciju procesa. U okviru *DoE* na raspolaganju je veliki broj dizajna koji se najopštije mogu podeliti u dve grupe: faktorijalne dizajne i one koji pripadaju metodi odzivne površi (eng. *response surface methodology – RSM*).

#### 2.4.2.2 Metoda odzivne površine

Dakle, Metoda odzivne površi predstavlja skup matematičkih i statističkih tehnika koje se koriste kako bi se definisala adekvatna funkcionalna relacija između posmatranih odziva nekog procesa i faktora koji na te odzive utiču [139,140]. Grafička zavisnost svakog od odziva  $y$  od ulaznih faktora  $x_1$  i  $x_2$  predstavlja se kao površ (Slika 2.10), odakle i potiče naziv metode.



**Slika 2.10.** Teorijska odzivna površ koja prikazuje zavisnost prinosa ( $y$ ) određenog procesa, od procesnih parametara vremena ( $x_1$ ) i temperature ( $x_2$ ) (preuzeto iz [140])

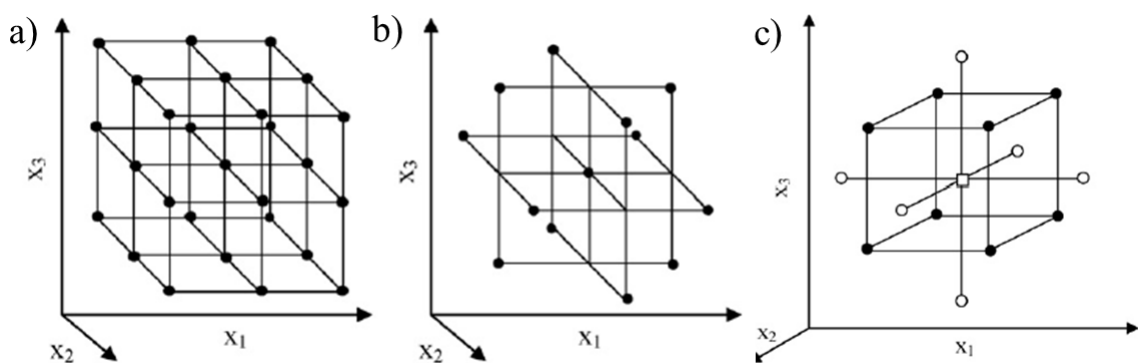
Metoda odzivne površi najčešće se koristi u industriji, da bi se razvio, unapredio i optimizovao određeni postupak u kojem više parametara utiče na odzive od značaja [140]. Implementacija *DoE* u cilju optimizacije obuhvata sledeće korake [141,142]:

1. Preliminarno ispitivanje u cilju odabira varijabli koje imaju najznačajniji uticaj na posmatrane izlaze

Na efektivnost operacije usitnjavanja, kao i na druge postupke koji se odvijaju u različitim granama industrije, utiče veliki broj faktora. Ispitivanje uticaja svakog od ovih faktora iziskuje mnogo vremena i ekonomski je neisplativo. Stoga se, u ovoj fazi, od faktora koji utiču na posmatrane odzive određuju oni sa najznačajnijim uticajem, a potom se oni dalje analiziraju i optimizuju. Kao dodatni parametar selekcije, u obzir se uzimaju rezultati i iskustva prethodnih istraživanja, a koja su rađena u sličnim sistemima. U ovu svrhu najčešće se koriste dizajni na dva nivoa ( $2^k$  faktorijalni dizajni, gde je sa  $k$  označen broj faktora) i to potpuni faktorijalni dizajni (eng. *full factorial*) kada je broj faktora od 2 do 4, odnosno delimični faktorijalni dizajni (eng. *fractional factorial*) Plackett-Burmanov ili Tagučijev dizajn u slučajevima kada je broj faktora 5 ili veći [141,143].

2. Odabir eksperimentalnog dizajna i izvođenje eksperimenata

Ako je krajnji cilj optimizacija procesa najčešće se koristi potpuni faktorijalni dizajn na tri nivoa ( $3^k$  faktorijalni dizajn), a u slučaju kada je potrebno smanjiti broj eksperimenata upotrebljavaju se Central composite design (CCD) i Box-Behnken design (BBD) [141,142]. Osnovna prednost  $3^k$  faktorijalnog dizajna je što pruža mogućnost fitovanja eksperimentalnih podataka kvadratnim modelom, za razliku od  $2^k$  faktorijalnog dizajna (gde se koriste linearni modeli sa interakcijama glavnih faktora) [141]. Raspodela faktora i njihovih nivoa koji su obuhvaćeni potpunim faktorijalnim, BBD i CCD dizajnom predstavljena je na Slici 2.11, respektivno.



**Slika 2.11.** a) Potpun faktorijalni b) BBD i c) CCD



### 3. Matematičko-statistička analiza rezultata eksperimenata

Eksperimenti se izvode prema odabranom dizajnu, a potom se dobijeni rezultati fituju odgovarajućim polinomnim modelima, najčešće modelom drugog reda [140]:

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=i+1}^k \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2, \quad (2.42)$$

gde  $y$  predstavlja posmatrani odziv,  $x_i$  i  $x_j$  uopšteno mogu biti kodirane ili aktuelne nezavisne promenjive, a  $\beta_0$ ,  $\beta_i$ ,  $\beta_{ii}$  i  $\beta_{ij}$  regresione koeficijente za odsečak, linearne, kvadratne i članove interakcije, respektivno. Da bi se odredili regresioni koeficijenti koristi se metoda najmanjih kvadrata [140,144] čime se definiše matematički model koji može da predvidi ponašanje odziva u okviru eksperimentalnog domena.

### 4. Provera adekvatnosti modela

Upotrebom analize varijansi (eng. *analysis of variance – ANOVA*) na osnovu odgovarajućih vrednosti sume kvadrata, srednje kvadratne greške,  $F$  i  $p$  vrednosti, stiče se uvid u stepen značajnosti kojim ispitivani faktori deluju na posmatrane odzive. Adekvatnost dobijenog matematičkog modela proverava se na osnovu koeficijenta determinacije ( $R^2$ ), varijanse (CV) i na osnovu vrednosti za nedostatak prilagođavanja (eng. *lack of fit*).

### 5. Verifikacija modela

Verifikacija modela podrazumeva izvođenje ponovljenih eksperimenata pri određenim uslovima. Upoređivanjem rezultata ostvarenih kroz eksperiment i rezultata koje je predvideo model za date uslove, utvrđuje se pogodnost modela za opisivanje posmatranog procesa.

### 6. Definisane optimalnih uslova

Poslednji korak predstavlja zadavanje željenih izlaza i traženje kombinacije ulaznih faktora koji će u najvećoj meri moći da postignu željene vrednosti izlaza. Ograničenje predstavlja činjenica da se ulazni faktori mogu kretati samo u opsegu vrednosti ispitivanog eksperimentalnog domena [142]. Optimalne vrednosti određuju se pomoću funkcija zadovoljenja (eng. *desirability functions*):

$$0 \leq d_i \leq 1, i = 1, 2, \dots, m, \quad (2.43)$$

koje opisuju postavljena ograničenja na izlaze, a cilj je da se maksimizuje ukupna funkcija zadovoljenja (eng. *overall desirability*) [140]:

$$D = \sqrt[m]{d_1 \cdot d_2 \cdots d_m}. \quad (2.44)$$

Prilikom zadavanja izlaza, moguće je određene izlaze označiti kao prioritetne, a tada će parametri biti postavljeni tako da u najvećoj meri zadovolje prvo prioritetne, a potom preostale izlaze.

### 2.4.2.3 Metoda odzivne površine u modelovanju tehnološkog postupka mlevenja pšenice

Poslednjih godina mnoga istraživanja bavila su se temom metode odzivne površine i njene primene u:

- postupcima ekstrakcije različitih komponenata iz biljnih materijala [145];
- poljoprivrednim i prehrambenim naukama [146];
- prehrambenoj industriji [143];
- istraživanjima vezanim za prirodne proizvode [147];
- tretmanu otpadnih voda [148–150], kao i mnogim drugim oblastima.

Pregledom ovih radova stiče se uvid u aktuelnost metode odzivne površine i njene podesnosti za upotrebu prilikom unapređenja različitih procesa. Posmatrano sa aspekta mlinske industrije i tehnologije preprade pšenice, RSM je bio korišćen za:

- kontrolu metode za određivanje kvaliteta pšenice [151];
- u postupcima vezanim za iskorišćenje mekinja i pšenične klice, kao sporednih proizvoda postupka mlevenja pšenice [152–154];
- u proceni uticaja koji uslovi tokom mlevenja imaju na kvalitet dobijenog brašna, testa i finalnog proizvoda [155];
- u proceni uticaja enzimskog tretmana na ponašanje zrna tokom mlevenja i dalje prerade [156];
- u proceni uticaja različitih mlevnih postupaka na kvalitet dobijenog brašna [157] i
- za ispitivanje mogućnosti uključivanja osmovaljne stolice u postupak mlevenja pšenice, kao alternativne opcije klasičnom postupku mlevenja [125].

Fišteš i saradnici upotrebili su RSM da bi ispitali uticaj parametara usitnjavanja na energetske potrošnje kugličnog mlina [158]. Za analizu i modelovanje postupka usitnjavanja na mlinskim valjcima Fišteš i saradnici [159] upotrebili su metodu odzivne površine da bi definisali optimalan razmak između valjaka pri usitnjavanju na tri uzastopna para žlebljenih valjaka (bez međuprosegavanja mliva), tako da se usitnjavanjem pšenice dobije željena raspodela veličine čestica mliva.

Međutim, metoda odzivne površine nije bila korišćena za ispitivanje kombinovanog uticaja parametara usitnjavanja na efektivnost operacije usitnjavanja mlinskim valjcima. Stoga će se jedan deo ove disertacije baviti primenom metode odzivne površine za analizu kombinovanog uticaja parametara usitnjavanja mlinskim valjcima na veći broj izlaza, uz optimizaciju posmatranog postupka.

#### 2.4.2.4 Alternativni pristupi u modelovanju tehnološkog postupka mlevenja pšenice

Za analizu i modelovanje postupka usitnjavanja pšenice, a zarad njegovog boljeg razumevanja i unapređenja, u mnogim istraživanjima korišćene su i druge metode, pored metode odzivne površine. U ovom poglavlju napraviće se kratak pregled tih istraživanja, ali se ona neće podrobnije razmatrati, sa obzirom da navedene metode nisu tema disertacije.

Metoda koja se pored RSM metode često koristi za potrebe definisanje funkcionalne zavisnosti između ulaznih parametara i vrednosti na izlazu, je metoda veštačkih neuronskih mreža (eng. *artificial neural networks – ANN*). U modelovanju postupaka vezanih za preradu pšeničnog zrna, ANN metoda korišćena je za:

- ispitivanje uticaja tipa pšenice, sadržaja vlage u zrnu, brzine brzohodnog valjka, prenosnog odnosa, razmaka između valjaka i specifičnog opterećenja valjaka na geometrijski srednji prečnik čestica mliva, povećanje specifične površine čestica i prinos ukupnog izvoda [160];
- optimizaciju postupka mikrotalasne ekstrakcije fenolnih komponenata iz pšenične klice [154];
- ispitivanje uticaja vrste pšenice, indeksa tvrdoće, veličine zrna, mase zrna i razmaka između valjaka na energetske pokazatelje efektivnosti usitnjavanja [161] i
- definisanje modela za predviđanje prinosa pšeničnog brašna, a na osnovu karakteristika pšeničnog zrna (zapreminske mase, mase 1000 zrna, raspodele veličine čestica zrna i tvrdoće zrna) [162].

Od drugih metoda za modelovanje postupka usitnjavanja korišćeni su i:

- funkcija za ocenu efikasnosti separacije anatomskih delova zrna pšenice koja se ostvari tokom tehnološkog postupka mlevenja [163,164];
- metod diskretnih elemenata (eng. *discrete elements method – DEM*) za modelovanje usitnjavanja na prvom prolazištu krupljenja [165] i
- metode analize glavnih komponenti (eng. *principal component analysis – PCA*), metoda parcijalnih najmanjih kvadrata (eng. *partial least squares – PLS*) i metoda zajedničkih odziva (eng. *Joint Y PLS - JY-PLS*) za modelovanje postupka usitnjavanja na devet različitih pasaža (dva u fazi krupljenja i sedam u fazi mlevenja griza) [166,167].

## 3.0 EKSPERIMENTALNI DEO

### 3.1 CILJ RADA

Ciljevi disertacije su dvojaki, te je istraživanje u radu sprovedeno u dve faze.

U prvoj fazi istraživanja cilj je bio primeniti koncept matrica usitnjavanja za kontrolu uticaja karakteristika usitnjavanog materijala na pokazatelje efektivnosti usitnjavanja. Prvo su matrice usitnjavanja primenjene u direktnom i povratnom (reverzibilnom) pristupu za predviđanje i kontrolu raspodele veličina čestica na prva tri prolazišta krupljenja, odnosno za predviđanje i kontrolu prinosa ukupnog izvoda na tim prolazištima. Nakon toga, matrice usitnjavanja su upotrebljene za definisanje karakteristika polaznog materijala (raspodele veličine čestica i sadržaja hemijskih komponenti u frakcijama ulaznog materijala) tako da se usitnjavanjem tog materijala na prvom prolazištu krupljenja, pri konstantnim parametrima usitnjavanja, postignu željeni prinosi frakcija, ali i zahtevani hemijski sastav dobijenih frakcija.

U drugom delu istraživanja ispitan je uticaj parametara usitnjavanja (razmak između valjaka, specifično opterećenje valjaka, obimna brzina valjaka i prenosni odnos) na pokazatelje efektivnosti usitnjavanja griza (prinos brašna, sadržaj pepela u brašnu i specifične utroške energije). U tu svrhu, upotrebljen je metod odzivne površine sa ciljem da se utvrdi uticaj svih pojedinačnih parametara usitnjavanja, kao i njihov kombinovani uticaj na pokazatelje efektivnosti usitnjavanja. Dodatno, u okviru druge faze metoda odzivne površine je primenjena da se optimizuju parametri usitnjavanja spram unapred definisanih (željenih) efekata usitnjavanja.

### 3.2 MESTO RADA

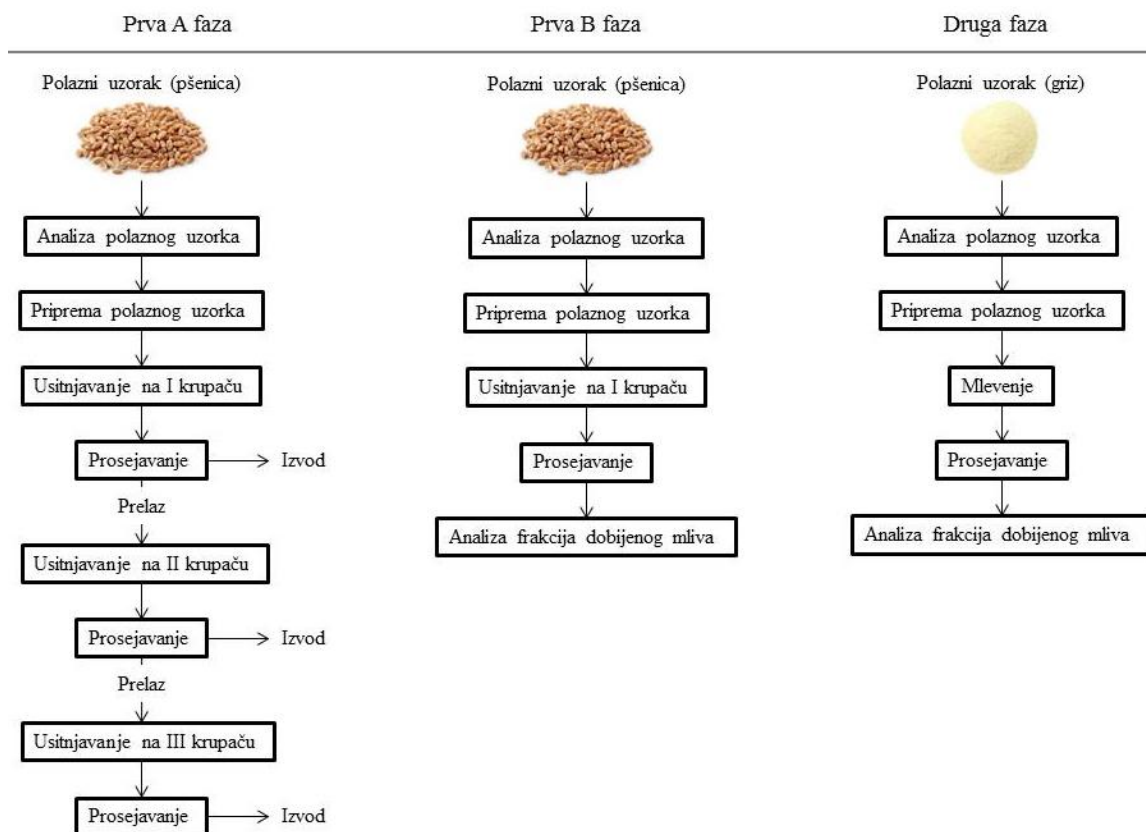
Eksperimentalna ispitivanja u obe faze istraživanja realizovana su u laboratorijama Tehnološkog fakulteta Novi Sad, Univerziteta u Novom Sadu.

### 3.3 ORGANIZACIJA EKSPERIMENTALNOG RADA

Eksperimentalna ispitivanja u prvoj fazi istraživanja podeljena su u dva segmenta:

- **prvu A fazu** u kojoj su ispitane mogućnosti primene koncepta matričnih jednačina u kontroli prinosa ukupnog izvoda kao i prinos pojedinih frakcija izvoda na prolazištima prvog kvaliteta u fazi krupljenja (I-III krupač) i
- **prvu B fazu** u kojoj su ispitane mogućnosti primene koncepta matričnih jednačina u kontroli raspodele veličine čestica i hemijskog sastava frakcija mliva dobijenih usitnjavanjem na prolazištu prvog krupljenja.

U drugoj fazi istraživanja ispitan je uticaj tehnoloških i kinematičkih parametara usitnjavanja na pokazatelje efektivnosti usitnjavanja griza. Šematski prikaz eksperimenta iz obe faze istraživanja dat je na Slici 3.1.



**Slika 3.1.** Šematski prikaz eksperimenata sprovedenih u okviru istraživanja

### 3.4 MATERIJAL ZA ISPITIVANJE

Za eksperimente sprovedene u prvoj fazi istraživanja korišćeni su sortno anonimni uzorci pšenice, polazne mase od po 10 kg. U drugoj fazi istraživanja polazni uzorak predstavljao je prečišćeni griz, uzorkovan nakon čišćenja na čistilicama griza. Masa ukupnog griza iznosila je 50 kg, a griz je dobijen iz lokalnog industrijskog mlina, kapaciteta 300 t/dan.

### 3.5 TEHNIKA

#### 3.5.1 Laboratorijska sita

##### 3.5.1.1 Sortimat (Perten AB, Hagersten, Sweden)

Raspodela veličina zrna polaznog uzorka pšenice koji je korišćen u oba eksperimenta u okviru prve faze istraživanja određena je primenom uređaja Sortimat (Perten AB, Hagersten, Sweden) (Slika 3.2). Upotrebljen je slog od tri metalna rešeta sa veličinom otvora od: 2,8×20

mm; 2,5×20 mm; 2,2×20 mm i dno. Na taj način formirane su tri frakcije zrna sledećih veličina: > 2,8×20 mm; 2,8×20 / 2,5×20 mm i < 2,5×20 mm. Time je istovremeno određen i maseni udeo formiranih frakcija zrna u polaznom uzorku.



**Slika 3.2.** Laboratorijsko sito Sortimat (Pertten AB, Hagersten, Sweden)

### **3.5.1.2 MLU 300 (Bühler, Switzerland)**

Granulacioni sastav griza korišćenog za polazni uzorak u drugoj fazi istraživanja i granulacioni sastav mliva dobijenog nakon usitnjavanja u obe faze istraživanja određen je analizom sejanja. Prosejavanje je obavljeno na slogu Bühler-ovog laboratorijskog sita model MLU-300 (Slika 3.3). Ekscentar sita je 0,0125 m, broj obrtaja 220 o/min. Sejna površina jednog rama sita iznosi 0,053 m<sup>2</sup>. Broj rama sita u formiranom slogu određuje i ukupnu sejnu površinu. Maksimalan broj sita u slogu je devet, što pruža mogućnost da se u slučajevima kada se mlivo razvrstava na manji broj frakcija, ili kada se određuje prinos brašna, mogu paralelno obaviti prosejavanja dva ili tri uzorka.



**Slika 3.3.** Laboratorijsko sito – model MLU-300, Bühler

### **3.5.2 Laboratorijska valjna stolica – Variostühl, model C Ex 2 (Miag, Braunschweig, Germany)**

Za usitnjavanje uzoraka u obe faze istraživanja korišćena je laboratorijska valjna stolica Variostühl, model C Ex 2 (Miag, Braunschweig, Germany) (Slika 3.4). Ime je dobila zbog

možnosti variranja parametara usitnjavanja u širokom rasponu. Predstavlja poluindustrijski laboratorijski uređaj koji omogućava rad u uslovima usitnjavanja sličnim onim u industrijskoj praksi. Pogodna je za laboratorijska ispitivanja jer se stečena znanja i zaključci izvedeni iz istraživanja sprovedenih na Variostühl-u mogu preneti na industrijske mlinove.

Zahvaljujući njenoj konstrukciji, upotrebom laboratorijske valjne stolice Variostühl moguće je ispitivanje uticaja tehnoloških, kinematičkih i geometrijskih parametara usitnjavanja u veoma širokom opsegu.

Pogonski deo uređaja smešten je u metalnom kućištu, a sačinjen je od prenosnog mehanizma sa motorom i ležajevima. Sa prednje strane kućišta nalaze se tahometri za očitavanje obimne brzine brzohodnog i sporohodnog valjka, kao i valjka hranilice. Dodatno, prednja strana laboratorijske stolice opremljena je i instrumentom (wat metar) za merenje snage potrebne za pokretanje Variostühl-a u praznom (bez materijala za usitnjavanje) i radnom hodu, odnosno tokom mlevenja.

Na poleđini kućišta nalazi se točak za podešavanje razmaka između valjaka i instrument sa kružnom skalom pomoću kojeg je moguće očitati razmak između valjaka. Ipak, razmak između valjaka najčešće je podešavan pomoću tzv. lisnatih merila. Na desnoj bočnoj strani kućišta laboratorijske stolice nalaze se poluge, pomoću kojih je moguće variranje kinematičkih parametara usitnjavanja (broj obrtaja brzohodnog valjka i prenosni odnos) i broja obrtaja valjka hranilice (kojim se kontroliše specifično opterećenje valjaka). Radni prostor instrumenta čine valjci za usitnjavanje ispod kojih se nalaze četke zadužene za čišćenje površine valjaka tokom usitnjavanja. Ispod je niša u koju se postavlja metalna posuda za prihvatanje mliva. Iznad valjaka nalazi se sistem za hranjenje mlinskih valjaka sačinjen od nasipnog levka, valjka hranilice i zasuna.



**Slika 3.4.** Laboratorijska valjna stolica – Variostühl C Ex 2 (Miag, Braunschweig, Germany)

Sistem za hranjenje nalazi se u kućištu načinjenom od providnog pleksiglasa što omogućava vizuelnu kontrolu isticanja materijala. Specifično opterećenje valjaka podešava se regulisanjem broja obrtaja hranilice i pomoću zasuna koji čini sistem za hranjenje. Zasun je

moguće pomerati kružno i translatorno te se korekcijom njegovog položaja može uticati na brže ili sporije isticanje materijala iz nasipnog levka.

Valjci su, kao osnovni radni element uređaja, postavljeni vodoravno ispod sistema za hranjenje. Prečnik valjaka je 250 mm, dužina 100 mm, a pokreće ih elektromotor snage 2,6 kW. Valjci mogu da rade u dva opsega brzina, a ukupni opseg brzina obrtaja valjaka je od 200 do 1400 obrtaja po minuti, odnosno od 2,6 do 18 m/s. Na kinematičke parametre valjaka utiče se sistemom poluga postavljenim sa desne strane uređaja. Jednom polugom moguće je menjati brzinu brzohodnog valjka uz istovremeno menjanje obrtaja sporohodnog valjka spram postavljenog prenosnog odnosa. Prenosni odnos valjaka menja se drugom polugom, a promena se svodi na korekciju brzine sporohodnog valjka u skladu sa odabranim prenosnim odnosom. Uređaj ima tri stepena prenosa (0, I i II) koji se podešavaju pomeranjem kvačila na prednjoj strani kućišta, a mogući opseg prenosnog odnosa je od 1 do 85.

Geometrijske parametre valjaka moguće je varirati promenom valjaka koji mogu biti glatki ili žlebljeni. Zahvaljujući simetričnoj konstrukciji, žlebljene valjke je moguće postaviti na nosač sa obe strane, te je moguće ostvariti bilo koji uzajamni položaj žlebljenih valjaka: leđa/leđa (L/L), oštrica/oštrica (O/O), oštrica/leđa (O/L) ili leđa/oštrica (L/O). Zahvaljujući pokretnom levom nosaču moguće je menjati razmak između valjaka, a razmak se određuje pomoću lisnatih merila.

### 3.5.3 Ostali pribor

Masa polaznih uzoraka i frakcija mliva određena je pomoću automatske tehničke vage „Sartorius“ sa osetljivošću  $\pm 0,1$  g i maksimalnom odvagom od 3 kg.

Analitička vaga „Radwag“ sa osetljivošću  $\pm 0,0001$ g i maksimalnom odvagom od 200 g korišćena je za merenje mase uzoraka za potrebe hemijskih analiza.

Za određivanje sadržaja vode u uzorcima korišćena je laboratorijska sušnica „Sutjeska“.

Za određivanje sadržaja pepela u uzorcima korišćena je laboratorijska peć za žarenje „Nabtherm“ i električni rešo za spaljivanje uzoraka namenjenih za određivanje sadržaja pepela.

Za određivanje zapreminske mase uzoraka korišćena je Šoperova vaga i specijalne tablice koje su priložene uz svaku vagu.

Za dobijanje preseka zrna na osnovu kog je posmatranjem određena staklavost pšenice korišćen je farinatom.

Za merenje vremena trajanja usitnjavanja korišćen je hronometar sa tačnošću merenja  $\pm 0,1$  s.

Za podešavanje razmaka između valjaka korišćena su lisnata merila.



## 3.6 METODE RADA

### 3.6.1 Analize polaznih uzoraka

#### 3.6.1.1 Prva faza

Za definisanje svojstava uzorka pšenice upotrebljenog u okviru prve A faze istraživanja odabrani su sledeći pokazatelji:

- raspodela veličina zrna izražena kao maseni udeo frakcija zrna različite krupnoće određena upotrebom uređaja Sortimat (Perten AB, Hagersten, Sweden),
- zapreminska masa određena primenom Šoperove vage i specijalnih tablica koje su priložene uz svaku vagu [168,169],
- masa 1000 zrna određena tako što je od prosečnog uzorka pšenice izbrojano 1000 zrna i izmerena masa; masa 1000 zrna je preračunata na suhu materiju [168,169],
- staklavost pšenice određena na osnovu posmatranja preseka zrna i svrstavanja u kategorije: potpuno staklava, 3/4 staklava, 1/2 staklava, 1/4 staklava, potpuno brašnava [169] za dobijanje preseka zrna korišćen je farinatom i
- sadržaj vode određen na osnovu standardne ICC metode 110/1 [170].

Rezultati ispitivanja svojstava polaznog materijala korišćenog za usitnjavanje u prvoj A fazi istraživanja prikazani su u Tabeli 3.1.

**Tabela 3.1.** Karakteristike materijala korišćenog za usitnjavanje u prvoj A fazi istraživanja

Pokazatelj	Materijal			
	Uzorak pšenice	Frakcija zrna		
Maseni udeo	-	> 2,8·20 mm	2,8/2,5·20 mm	< 2,5·20 mm
		0,705	0,219	0,076
Zapreminska masa (kg/m <sup>3</sup> )	790	805	799	787
Masa 1000 zrna (g) <sub>sm</sub>	33,5	40,1	34,1	25,9
Ukupna staklavost (%)	60,0	65,2	61,8	54,9
Sadržaj vode (%)	10,4	10,8	10,5	10,4

Za definisanje svojstava uzorka pšenice upotrebljenog u okviru prve B faze istraživanja odabrani su sledeći pokazatelji:

- raspodela veličina zrna izražena kao maseni udeo frakcija zrna različite krupnoće određena upotrebom uređaja Sortimat (Perten AB, Hagersten, Sweden),
- sadržaj vode određen na osnovu standardne ICC metode 110/1 [170] i
- sadržaj pepela određen na osnovu standardne ICC metode 104/1 [171]

Rezultati ispitivanja svojstava polaznog materijala za usitnjavanje u prvoj B fazi istraživanja prikazani su u Tabeli 3.2.

**Tabela 3.2.** Karakteristike materijala korišćenog za usitnjavanje u prvoj B fazi istraživanja

Pokazatelj	Materijal			
	Uzorak pšenice	Frakcija zrna		
Maseni udeo	-	> 2,8·20 mm	2,8/2,5·20 mm	< 2,5·20 mm
		0,551	0,314	0,135
Sadržaj vode (%)	10,4	10,5	10,2	10,4
Sadržaj pepela (%) <sub>sm</sub>	1,48	1,4	1,47	1,58

### 3.6.1.2 Druga faza

Za definisanje svojstava uzorka prečišćenog griza upotrebljenog u okviru druge faze istraživanja odabrani su sledeći pokazatelji:

- granulometrijski sastav određen analizom sejanja uz upotrebu laboratorijskog sita Bühler MLU-300,
- sadržaj vode određen na osnovu standardne ICC metode 110/1 [170] i
- sadržaj pepela određen na osnovu standardne ICC metode 104/1 [171].

Rezultati ispitivanja svojstava polaznog materijala za usitnjavanje u drugoj fazi istraživanja prikazani su u Tabeli 3.3.

**Tabela 3.3.** Karakteristike griza korišćenog za usitnjavanje u drugoj fazi istraživanja

Pokazatelj	Prečišćeni griz
Sadržaj vode (%)	12,26
Sadržaj pepela (%) <sub>sm</sub>	0,43
Maseni udeo frakcije (%)	
>450 [μm]	38,79
450/350 [μm]	49,69
350/250 [μm]	10,06
<250 [μm]	1,35

## 3.6.2 Priprema uzoraka za mlevenje

### 3.6.2.1 Prva faza

Pšenica korišćena za usitnjavanje u eksperimentima prve faze istraživanja, odnosno uzorci frakcije zrna različite veličine, prvobitno su podeljene u uzorke za usitnjavanje mase 0,5 kg. Redukcija uzoraka obavljena je propuštanjem uzoraka kroz automatski delilac uzoraka, Gompper-Maschinen KG (Slika 3.5).



**Slika 3.5.** Automatski delilac uzoraka, Gompper-Maschinen KG

Potom su uzorci podvrgnuti dvostepenom postupku kondicioniranja. U prvom stepenu, voda je dodata u količini koja će prouzrokovati da se sadržaj vode u svim uzorcima podigne na vrednost od 13,5%; vreme odležavanja uzoraka u prvom stepenu trajalo je 20 h.

Drugi stepen kondicioniranja razlikovao se za uzorke korišćene u prvoj A fazi istraživanja od onih koji su korišćeni u prvoj B fazi, što je prilagođeno strukturno-mehaničkim svojstvima uzoraka pšenice. Uzorci korišćeni u prvoj A fazi vlaženi su do sadržaja vode od 15%, uz odležavanje od 8 h. Uzorci korišćeni u prvoj B fazi vlaženi su do sadržaja vode od 16% uz odležavanje od 12 h.

Na kraju je, u oba slučaja, neposredno pre mlevenja, sadržaj vode podignut za dodatnih 0,5%, uz odležavanje od 30 minuta.

Postupak vlaženja sproveden je tako što su odmereni uzorci odvojeni u plastične kesice, a potom se biretom dodavala potrebna količina vode za svaki stepen vlaženja. Uzorci su

homogenizovani mešanjem sadržaja u kesici, kako bi se dodata voda ravnomerno rasporedila po zrnenoj masi.

Upotrebom relacije (3.1) određena je masa vode koju je potrebno dodati uzorku, kako bi sadržaj vlage u njemu bio na željenom nivou.

$$m_w = m_z \cdot \frac{W_k - W_p}{100 - W_k}, \quad (3.1)$$

gde oznake u navedenoj jednačini predstavljaju:

- $m_w$  [kg] – masu vode koju treba dodati zrnenoj masi kako bi se postigao željen sadržaj vode,
- $m_z$  [kg] - masu zrna,
- $W_k$  [%] – sadržaj vode u zrnenoj masi nakon kondicioniranja i
- $W_p$  [%] – sadržaj vode u zrnenoj masi pre kondicioniranja.

### 3.6.2.2 Druga faza

Materijal korišćen za usitnjavanje u drugoj fazi istraživanja pripremljen je tako što je pre usitnjavanja homogenizovan i redukovan do uzoraka za mlevenje mase 1,0 kg. Homogenizovanje i redukcija uzoraka za mlevenje obavljena je propuštanjem uzoraka kroz automatski delilac uzoraka, Gompper-Maschinen KG (Slika 3.5).

### 3.6.3 Usitnjavanje uzoraka

Za usitnjavanje u obe faze istraživanja korišćena je prethodno opisana laboratorijska valjna stolica Variostühl C Ex 2, ali se, u zavisnosti od faze istraživanja, menjao usitnjavani materijal, kao i parametri usitnjavanja.

#### 3.6.3.1 Prva faza

U prvoj A fazi posmatrana su prva tri prolazišta krupljenja, dok je u prvoj B fazi posmatrano jedno, prvo prolazište krupljenja. Stoga su parametri usitnjavanja postavljeni tako da simuliraju uslove rada na datim prolazištima, u industrijskim uslovima.

Parametri usitnjavanja u oba dela prve faze istraživanja prikazani su u Tabeli 3.4.

**Tabela 3.4.** Parametri usitnjavanja na prolazištima krupljenja u prvoj fazi istraživanja

Parametar usitnjavanja	A faza			B faza
	Prolazište krupljenja			Prolazište krupljenja
	I	II	III	I
Broj žlebova po centimetru obima valjka [ž/cm]	3,2	4,5	6,7	3,2
Nagib žlebova [%]	8	8	10	8
Uglovi oštrice i leđa [°]	40/70	40/70	40/70	40/70
Uzajamni položaj žlebova	L/L	O/O	O/O	L/L
Broj obrtaja brzohodnog valjka [o/min] (Obimna brzina brzohodnog valjka [m/s])	325 (4,25)	460 (6)	460 (6)	460 (6)
Prenosni odnos	2,5	2,5	2,5	2,5
Razmak između valjaka [mm]	0,6	0,4	0,3	0,5
Specifično opterećenje valjaka [kg/cm·min]	0,42	0,24	0,24	0,126

### 3.6.3.2 Druga faza

Druga faza istraživanja bavila se ispitivanjem uticaja koji promena tehnoloških (razmak između valjaka i specifično opterećenje valjaka) i kinematičkih (broj obrtaja valjaka i prenosni odnos) parametara usitnjavanja ispoljava na kvantitativne, kvalitativne i energetske pokazatelje efektivnosti usitnjavanja griza. Stoga su u ovoj fazi istraživanja korišćeni valjci glatke površine, a svaki od ispitivanih parametara variran je na tri ekvidistantna nivoa (Tabela 3.5).

U obe faze, razmak između valjaka podešavan je pomoću lisnatih merila, a brzina valjaka sistemom poluga koji čine sastavni deo uređaja za usitnjavanje. Prenosni odnos je postavljen usklađivanjem broja obrtaja brzohodnog i sporohodnog valjka, spram sledeće relacije:

$$i = \frac{v_b}{v_s} = \frac{n_b}{n_s}. \quad (3.2)$$

Veza između brzina i broja obrtaja valjaka data je relacijom:

$$v = \frac{D \cdot \pi \cdot n}{60}. \quad (3.3)$$

U navedenim jednačinama  $v_b$  i  $v_s$  predstavljaju obimne brzine brzohodnog, odnosno sporohodnog valjka, dok  $n_b$  i  $n_s$  označavaju brojeve obrtaja brzohodnog i sporohodnog valjka, respektivno. Sa  $D$  je označen prečnik valjaka.

**Tabela 3.5.** Vrednosti parametara usitnjavanja u drugoj fazi istraživanja

Parametar usitnjavanja	Minimum	Sredina	Maksimum
Razmak između valjaka [mm]	0,04	0,07	0,1
Broj obrtaja brzohodnog valjka [o/min] (Obimna brzina brzohodnog valjka [m/s])	300 (3,9)	400 (5,2)	500 (6,5)
Prenosni odnos	1,1	1,5	1,9
Specifično opterećenje valjaka [kg/cm·min]	0,2	0,3	0,4

U Tabeli 3.6 prikazane su vrednosti broja obrtaja brzohodnog i sporohodnog valjka korišćenih u eksperimentima u okviru druge faze, pri kojima su se postizali odgovarajući prenosni odnosi.

Specifično opterećenje valjaka podešavano je promenom broja obrtaja valjaka hranilice tako da se ostvari potrebno vreme usitnjavanja [s], a spram ciljanog specifičnog opterećenja. Pomenuto je ilustrovano primerom za drugu fazu istraživanja (Tabela 3.7).

**Tabela 3.6.** Zavisnost broja obrtaja sporohodnog valjka od broja obrtaja brzohodnog valjka i odabranog prenosnog odnosa

Broj obrtaja brzohodnog valjka [o/min]	Prenosni odnos		
	i = 1,1	i = 1,5	i = 1,9
$n_b = 300$	$n_s = 270$	$n_s = 200$	$n_s = 160$
$n_b = 400$	$n_s = 360$	$n_s = 265$	$n_s = 210$
$n_b = 500$	$n_s = 455$	$n_s = 340$	$n_s = 260$

Tahometrom koji je sastavni deo uređaja za usitnjavanje kontrolisan je broj obrtaja, a zasun hranilice je održavan konstantnim. Na osnovu relacije (3.4) izračunato je specifično opterećenje valjaka:

$$m' = \frac{M}{l \cdot t} \cdot 60. \quad (3.4)$$

U navedenoj jednačini oznake predstavljaju:

- $m'$  [kg/cm·min] – specifično opterećenje valjaka,
- $M$  [kg] – masu materijala koji se usitnjava,
- $l$  [cm] – radnu valjnu dužina ( $l=10$  cm) i
- $t$  [s] – vreme trajanja usitnjavanja.

U Tabeli 3.7 prikazane su vrednosti parametara pri kojima je postignuto željeno specifično opterećenje valjaka tokom mlevenja.

**Tabela 3.7.** Parametri za podešavanje specifičnog opterećenja valjaka

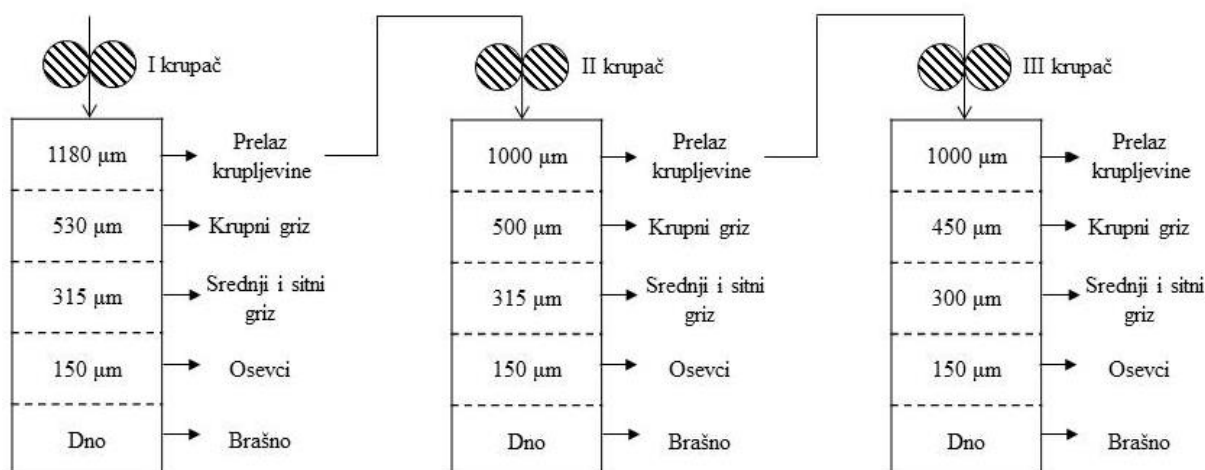
Specifično opterećenje valjaka (kg/cm·min)	Broj obrtaja valjaka hranilice (o/min)	Trajanje usitnjavanja [s]
0,2	50	14,5 – 15,5
0,3	80	9,5 – 10,5
0,4	100	7 – 8

### 3.6.4 Efekti usitnjavanja

#### 3.6.4.1 Prva faza

U prvoj A fazi ispitivanja, efekti usitnjavanja praćeni su na osnovu granulacionog sastava dobijenog mliva, dok je u prvoj B fazi pored granulacionog sastava praćen i sadržaja pepela u frakcijama mliva. Za određivanje granulacionog sastava mliva u prvoj A fazi istraživanja korišćeni su različiti slogovi sita, u zavisnosti od prolazišta krupljenja (Slika 3.6). U prvoj B fazi istraživanja, slog sita sastojao se od sita sa veličinama otvora od: 2000, 1180, 850, 600, 450, 300 i 150  $\mu\text{m}$ .

Masa pojedinačnih uzoraka za analizu sejanja bila je oko 100 g, a obzirom da je ukupna masa usitnjavanog materijala iznosila 1 kg, urađen je veći broj prosejavanja za svaki uzorak na istom slogu sita. Prinos pojedinačnih frakcija mliva i prinos brašna dobijeni su zbrajanjem frakcija iste veličine i izražavanjem te mase u odnosu na masu polaznog uzorka. Sva prosejavanja trajala su po 3 minuta. Za čišćenje sita tokom prosejavanja korišćene su gumene kuglice.



**Slika 3.6.** Šematski prikaz slogova sita i frakcija koje se izdvajaju na prolazištima prvog, drugog i trećeg krupljenja u prvoj A fazi istraživanja

Raspodela veličine čestica mliva određena je kao masena distribucija. Za merenja mase pšenice i mliva korišćene su automatska tehnička vaga Sartorius (osetljivost +/- 0.1g) i analitička vaga Radwag (osetljivost +/- 0.0001 g).

Sadržaj pepela u frakcijama mliva određen je po standardnoj ICC metodi 104/1 [171].

### 3.6.4.2 Druga faza

Efekti usitnjavanja u drugoj fazi istraživanja praćeni su preko četiri parametra:

- prinosa brašna (%),
- sadržaja pepela u brašnu (%)<sub>SM</sub>,
- utroška energije za usitnjavanje po jedinici mase samlevenog materijala (kJ/kg) i
- utroška energije za usitnjavanje po jedinici mase brašna (kJ/kg).

Da bi se odredio prinos brašna, ukupan uzorak mliva mase 1 kg podeljen je na uzorke za analizu, mase oko 100 g i prosejavan na laboratorijskom situ Bühler MLU-300. Prosejavanja su trajala 3 minuta, a za odsejavanje brašna korišćeno je sito sa veličinom otvora od 150 μm. Masa dobijenih frakcija izmerena je upotrebom automatske tehničke vage Sartorius (osetljivost +/- 0.1g), nakon čega je prinos brašna izražen u odnosu na polaznu masu materijala, prema sledećem obrascu:

$$b (\%) = \frac{m}{M} \cdot 100 . \quad (3.5)$$

U navedenoj jednačini sa  $b$  je označen prinos frakcije brašna izražen procentima, dok su sa  $m$  i  $M$  označene masa frakcije brašna i masa ukupnog prosejavanog materijala u kilogramima, respektivno.

Sadržaj pepela u frakciji brašna određen je po standardnoj ICC metodi 104/1 [171].

Za praćenje utroška energije korišćen je sastavni deo laboratorijske valjne stolice Variostühl – instrument (wat metar) kojim je moguće izmeriti snagu potrebnu za pokretanje valjaka u praznom i radnom hodu, odnosno tokom mlevenja. Utrošci energije izračunati su prema sledećim relacijama:

$$E [kJ/kg] = \frac{P_w}{M} \cdot t \quad (3.6)$$

$$E [kJ/kg] = \frac{P_w}{m} \cdot t . \quad (3.7)$$

Jednačina (3.6) korišćena je da se izračuna utrošak energije za usitnjavanje po jedinici mase samlevenog materijala. Sa  $P_w$  (kW) je označena snaga potrebna za pokretanje valjne stolice, tokom usitnjavanja materijala, odnosno dok je materijal prisutan u mlevnom prostoru. Sa  $t$  (s) i  $M$  (kg) označeno je vreme trajanja operacije usitnjavanja izmereno hronometrom i masa materijala koji se usitnjava, respektivno. Oznake u jednačini (3.7) imaju istovetnu konotaciju



kao i za jednačinu (3.6), sa jedinom razlikom što se masa materijala u ovom slučaju odnosi na masu dobijenog brašna, izraženu u kilogramima i označenu sa  $m$ .

### 3.6.5 Postavka matričnih jednačina

#### 3.6.5.1 Prva A faza

Polazni uzorak pšenice prvobitno je prosejan i razvrstan na tri frakcije zrna različite krupnoće:

1. frakcija  $> 2,8 \times 20$  mm,
2. frakcija  $2,8 \times 20 / 2,5 \times 20$  mm i
3. frakcija  $< 2,5 \times 20$  mm.

Na osnovu rezultata prosejavanja formiran je ulazni vektor  $f$  (3.8), gde članovi vektor kolone  $f_1, f_2$  i  $f_3$  predstavljaju masene udele svake od navedenih frakcija zrna:

$$f = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{bmatrix}. \quad (3.8)$$

Svaka pojedinačna ulazna frakcija zrna je nakon toga usitnjena, a parametri usitnjavanja održavani su konstantnim (Tabela 3.4). Nakon usitnjavanja, mlivo dobijeno usitnjavanjem svake od ulaznih frakcija je prosejano i razvrstano na sledećih pet frakcija:

1. frakcija  $> 1180$   $\mu\text{m}$ ,
2. frakcija  $1180/530$   $\mu\text{m}$ ,
3. frakcija  $530/315$   $\mu\text{m}$ ,
4. frakcija  $315/150$   $\mu\text{m}$  i
5. frakcija  $< 150$   $\mu\text{m}$ .

Na osnovu rezultata prosejavanja formirana je matrica usitnjavanja  $B$ , za prvo prolazište krupljenja (3.9):

$$B^{(1)} = \begin{bmatrix} b_{11}^1 & b_{12}^1 & b_{13}^1 \\ b_{21}^1 & b_{22}^1 & b_{23}^1 \\ b_{31}^1 & b_{32}^1 & b_{33}^1 \\ b_{41}^1 & b_{42}^1 & b_{43}^1 \\ b_{51}^1 & b_{52}^1 & b_{53}^1 \end{bmatrix}. \quad (3.9)$$

U navedenoj matrici usitnjavanja, element matrice  $b_{ij}^1$  predstavlja maseni udeo izlazne frakcije  $j$  ( $j = 1 - 5$ ) koja se dobije usitnjavanjem ulazne frakcije  $i$  ( $i = 1 - 3$ ).

Na kraju je, na osnovu rezultata prosejavanja, formiran izlazni vektor  $o$  (3.10), gde članovi vektor kolone  $o_1, o_2, o_3, o_4$  i  $o_5$  predstavljaju masene udele svake od navedenih frakcija:

$$o^1 = \begin{bmatrix} o_1^1 \\ o_2^1 \\ o_3^1 \\ o_4^1 \\ o_5^1 \end{bmatrix}. \quad (3.10)$$

Na osnovu formiranih članova, matricna jednačina usitnjavanja na prvom prolazištu krupljenja izražena je u sledećem obliku:

$$B^1 \cdot f = o^1, \quad (3.11)$$

odnosno, u raspisanom obliku:

$$\begin{bmatrix} b_{11}^1 & b_{12}^1 & b_{13}^1 \\ b_{21}^1 & b_{22}^1 & b_{23}^1 \\ b_{31}^1 & b_{32}^1 & b_{33}^1 \\ b_{41}^1 & b_{42}^1 & b_{43}^1 \\ b_{51}^1 & b_{52}^1 & b_{53}^1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} o_1^1 \\ o_2^1 \\ o_3^1 \\ o_4^1 \\ o_5^1 \end{bmatrix}. \quad (3.12)$$

Navedena matricna jednačina upotrebljena je za predviđanje raspodele veličine čestica izlaznog materijala na prvom prolazištu krupljenja.

Fracija prelaza kruplevine sa prvog krupača (fracija >1180  $\mu\text{m}$ , odnosno element vektor kolone  $o_1^1$ ), predstavljala je ulaz na II krupač, dok je fracija prelaza kruplevine sa drugog krupača (fracija >1000  $\mu\text{m}$ , odnosno element vektor kolone  $o_1^2$ ), predstavljala ulaz na III krupač. Na osnovu analize sejanja mliva nakon usitnjavanja na II i III krupaču, formirane su matrice usitnjavanja za ta prolazišta ( $B^{(2)}$  i  $B^{(3)}$ , respektivno), a po istom principu kao u slučaju prvog krupača.

$$B^{(2)} = \begin{bmatrix} b_1^2 \\ b_2^2 \\ b_3^2 \\ b_4^2 \\ b_5^2 \end{bmatrix}, o_1^2 \cdot B^{(2)} = \begin{bmatrix} o_1^2 \\ o_2^2 \\ o_3^2 \\ o_4^2 \\ o_5^2 \end{bmatrix} = o^{(2)} \quad (3.13)$$

$$B^{(3)} = \begin{bmatrix} b_1^3 \\ b_2^3 \\ b_3^3 \\ b_4^3 \\ b_5^3 \end{bmatrix}, o_1^3 \cdot B^{(3)} = \begin{bmatrix} o_1^3 \\ o_2^3 \\ o_3^3 \\ o_4^3 \\ o_5^3 \end{bmatrix} = o^{(3)} \quad (3.14)$$

U jednačinama (3.13) i (3.14), brojevi u donjem indeksu (od 1 do 5) označavaju fraciju mliva (od krupnije prema sitnijoj), dok brojevi 2 i 3 u gornjem indeksu označavaju prolazište krupljenja. Za sve navedene jednačine važe sledeći uslovi:

$$\sum_{i=1}^5 b_{ij}^1 = 1, 1 \leq j \leq 3; \sum_{i=1}^5 b_i^2 = 1; \sum_{i=1}^5 b_i^3 = 1; \sum_{j=1}^3 f_j^2 = 1; \sum_{i=1}^5 o_i^1 = 1. \quad (3.15)$$

Prinos ukupnog izvoda na prolazištima krupljenja računat je kao zbir frakcija mliva označenih u indeksu sa brojevima od 2 do 5. Zapravo, prinos ukupnog izvoda predstavlja zbir frakcija mliva koje ne prelaze na sledeći krupač, a to su frakcije: krupnog griza, srednjeg i sitnog griza, osevaka i brašna (Slika 3.3). Prinos ukupnog izvoda (*PUI*) na svakom od krupača računat je u odnosu na količinu materijala koja dolazi na prvi krupač. Kumulativni prinos ukupnog izvoda računat je kao zbir prinosa ukupnog izvoda sa svakog od tri krupača. Pored prinosa ukupnog izvoda, računat je i zbirni prinos svake od frakcija koje se izdvajaju na prolazištima krupljenja. Na primer, prinos brašna je izračunat tako što su se elementi matrica koje označavaju frakciju brašna ( $o_5^1, o_5^2$  i  $o_5^3$ ) sabrani i izraženi u odnosu na količinu polaznog materijala na prvom krupaču, što je urađeno i za svaku od frakcija izvoda. Pomenuti prinosi frakcija označeni su kao horizontalni prinosi ( $HP_i, 2 \leq i \leq 5$ ).

### 3.6.5.2 Prva B faza

Mlivo je razvrstano na osam frakcija, prosejavanjem na sitima sa veličinom otvora od 2000, 1180, 850, 600, 450, 300 i 150  $\mu\text{m}$ . U svakoj od dobijenih frakcija određen je sadržaj pepela. Dobijeni podaci iskorišćeni su za formiranje matrice usitnjavanja za predviđanje raspodele veličine čestica *B* i matrice za predviđajne raspodele sadržaja pepela po dobijenim frakcijama mliva *Y*. Način formiranja matrica detaljno je opisan u okviru Rezultata i diskusije u poglavlju 4.1.2.1. Raspodela veličine čestica određena je u odnosu na suhu materiju.

### 3.6.6 Eksperimentalni plan i statistička obrada podataka

Eksperimenti u okviru druge faze istraživanja izvedeni su prema Box-Behnken eksperimentalnom dizajnu (BBD). Ispitivan je uticaj četiri parametra, na tri nivoa, sa tri ponovljena eksperimenta u centralnoj tački. Tako je broj eksperimenata sa 81 (u slučaju potpunog faktorijalnog dizajna) smanjen na 27, ali sa dovoljno informacija da se izvrši testiranje na nedostatak fitovanja (eng. *lack of fit*), sa obzirom da su tri centralne tačke bile uključene. Četiri ispitivana parametra bili su: A – razmak između valjaka [mm], B – broj obrtaja brzohodnog valjka [o/min], C – prenosni odnos i D – specifično opterećenje valjaka [kg/cm $\cdot$ min]. Kao odzivni parametri posmatrani su: R1 – prinos brašna (%), R2 – sadržaj pepela u brašnu (%)<sub>sm</sub>, R3 – utrošak energije u odnosu na masu samlevenog materijala [kJ/kg] i R4 – utrošak energije u odnosu na masu dobijenog brašna [kJ/kg]. Preporučeni raspored eksperimenata, sa kombinacijom ulaznih parametara i vrednostima ostvarenih odziva prikazan je u Tabeli 3.8.

**Tabela 3.8.** Box-Behnken eksperimentalni dizajn za drugu fazu istraživanja (A – razmak između valjaka [mm], B – broj obrtaja brzohodnog valjka [o/min], C – prenosni odnos i D – specifično opterećenje valjaka [kg/cm·min], R1 – prinos brašna (%), R2 – sadržaj pepela u brašnu (%)<sub>sm</sub>, R3 – utrošak energije u odnosu na masu samlevenog materijala [kJ/kg] i R4 – utrošak energije u odnosu na masu dobijenog brašna [kJ/kg])

Broj eksperimenta	Upravljivi parametri procesa merenja			
	A (mm)	B (o/min)	C	D (kg/cm·min)
1	0.04	300	1.5	0.3
2	0.1	300	1.5	0.3
3	0.04	500	1.5	0.3
4	0.1	500	1.5	0.3
5	0.07	400	1.1	0.2
6	0.07	400	1.9	0.2
7	0.07	400	1.1	0.4
8	0.07	400	1.9	0.4
9	0.04	400	1.5	0.2
10	0.1	400	1.5	0.2
11	0.04	400	1.5	0.4
12	0.1	400	1.5	0.4
13	0.07	300	1.1	0.3
14	0.07	500	1.1	0.3
15	0.07	300	1.9	0.3
16	0.07	500	1.9	0.3
17	0.04	400	1.1	0.3
18	0.1	400	1.1	0.3
19	0.04	400	1.9	0.3
20	0.1	400	1.9	0.3
21	0.07	300	1.5	0.2
22	0.07	500	1.5	0.2
23	0.07	300	1.5	0.4
24	0.07	500	1.5	0.4
25	0.07	400	1.5	0.3
26	0.07	400	1.5	0.3
27	0.07	400	1.5	0.3

Koeficijenti modela računati su pomoću nelinearne regresione analize. Za dobijanje empirijskih formula korišćen je polinom drugog stepena:

$$R = \beta_0 + \beta_1 A + \beta_2 B + \beta_3 C + \beta_4 D + \beta_{12} AB + \beta_{13} AC + \beta_{14} AD + \beta_{23} BC + \beta_{24} BD + \beta_{34} CD + \beta_{11} A^2 + \beta_{22} B^2 + \beta_{33} C^2 + \beta_{44} D^2. \quad (3.16)$$

Oznake u navedenoj jednačini (3.16) predstavljaju:

- $R$  – posmatrani odziv;
- $\beta_0$  – odsečak;
- faktori od  $\beta_1$  do  $\beta_{44}$  – regresione koeficijente;
- $A, B, C$  i  $D$  – kodirane vrednosti ulaznih parametara;
- $AB, AC, AD, BC, BD$  i  $CD$  – interakcije ulaznih parametara i
- $A^2, B^2, C^2$  i  $D^2$  – kvadratne uticaje ulaznih parametara.

Adekvatnost modela proverena je na osnovu vrednosti  $R^2$  i koeficijenta nedostatka poklapanja. Statistička značajnost uticaja ulaznih parametara na posmatrane odzive određena je statističkom metodom analize varijansi – *ANOVA*. Uticaj faktora smatran je statistički značajan, ukoliko je  $p$  vrednost bila manja od 0,05. Na osnovu sume kvadrata, dobijene analizom varijansi izračunate su odgovarajuće vrednosti uticaja parametara na posmatrane odzive. Statističke analize u okviru druge faze istraživanja izvedene su korišćenjem softvera Statistica 13.5 i Design-Expert 11 [172].

## 4.0 REZULTATI I DISKUSIJA

Diskusija rezultata sprovedena je spram navedenih ciljeva rada. U prvom delu, odnosno poglavlju 4.1, diskutovano se o mogućnostima primene reverzibilnosti matrica usitnjavanja za kontrolu efekata usitnjavanja u fazi krupljenja pšenice. Poglavlje 4.1.1 razmatra mogućnost primene matrica usitnjavanja za kontrolu prinosa ukupnog izvoda na prva tri prolazišta krupljenja. Pomenuti koncept primenjen je u direktnom i reverzibilnom smeru pri višestrukom usitnjavanju na sukcesivno povezanim prolazištima mlevenja (prva tri prolazišta krupljenja) u svrhu kontrole kvantitativnih pokazatelja efektivnosti usitnjavanja: prinosa ukupnog izvoda i prinosa pojedinih frakcija mliva. Poglavlje 4.1.2 koristi princip reverznih (povratnih) matrica usitnjavanja za kontrolu raspodele veličine čestica i hemijskog sastava (sadržaj pepela) frakcija mliva tokom usitnjavanja na prolazištu prvog krupljenja. Za svaku od faza, najpre su dati opšti teorijski principi koji su zatim ilustrovani konkretnim primerima mlevenja pšenice. Drugi deo poglavlja Rezultati i diskusija, poglavlje 4.2, usmeren je na primenu metode odzivne površine za analiziranje uticaja parametara usitnjavanja na efekte usitnjavanja griza, a zatim i njihovu optimizaciju spram željenih (unapred definisanih) vrednosti pokazatelja efekata mlevenja.

### 4.1 PRVA FAZA

#### 4.1.1 Prva A faza

##### 4.1.1.1 Teorijski deo

U opštem slučaju gde je broj prolazišta  $p$ , broj frakcija ulaza  $n$ , a broj frakcija izlaza (mliva)  $m$ , postupak višestrukog i sukcesivnog usitnjavanja je matricama usitnjavanja moguće predstaviti sledećom jednačinom:

$$B^{(1)} \cdot f = o^{(1)}, B^{(i)} \cdot o_1^{(i-1)} = o^{(i)}, 2 \leq i \leq p, \quad (4.1)$$

gde oznaka 1 u gornjem indeksu označava prvo prolazište usitnjavanja, a  $i$  predstavlja svaki naredni korak usitnjavanja. Tada, matrice usitnjavanja imaju sledeći oblik:

$$B^{(1)} = \begin{bmatrix} b_{11}^1 & b_{12}^1 & \cdots & b_{1n}^1 \\ b_{21}^1 & b_{22}^1 & \cdots & b_{2n}^1 \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ b_{m1}^1 & b_{m2}^1 & \cdots & b_{mn}^1 \end{bmatrix}, B^{(i)} = \begin{bmatrix} b_1^i \\ b_2^i \\ \vdots \\ b_m^i \end{bmatrix}, 2 \leq i \leq p, \quad (4.2)$$

a raspodela veličina čestica ulaza  $f$  i izlaza (mliva)  $o$  se prikazuje vektorima u obliku:

$$f = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \vdots \\ f_n \end{bmatrix}, o^{(i)} = \begin{bmatrix} o_1^i \\ o_2^i \\ \vdots \\ o_m^i \end{bmatrix}, 1 \leq i \leq p. \quad (4.3)$$

Vrednosti za raspodelu veličina čestica izlaza iz jednačine date sa (4.1) računaju se na sledeći način:

$$o_i^1 = \sum_{j=1}^n b_{ij}^1 \cdot f_j, o_i^k = b_i^k \cdot o_1^{k-1}, 1 \leq i \leq m, 2 \leq k \leq p. \quad (4.4)$$

Svakom kolonom matrice usitnjavanja prikazana je distribucija masenih udela i važi da je:

$$\sum_{i=1}^m b_{ij}^1 = 1, 1 \leq j \leq n, \sum_{i=1}^m b_i^k = 1, 2 \leq k \leq p, \sum_{j=1}^n f_j = 1, \quad (4.5)$$

što, kada se uzme u obzir jednačina (4.1), implicira:

$$\sum_{i=1}^m o_i^1 = 1, \sum_{i=1}^m o_i^k = o_1^{k-1}, 2 \leq k \leq p. \quad (4.6)$$

Odnosno, kako elementi vektora  $f$  i  $o$ , kao i elementi matrice usitnjavanja  $B$  predstavljaju masene udele, podrazumeva se da njihove vrednosti moraju da budu u opsegu od 0 do 1. Pored toga, iz istih razloga zbir elemenata u svakoj koloni matrice usitnjavanja je jednak jedinici.

Za odabranu raspodelu veličina čestica na ulazu, prinosi ukupnih izvoda ( $PUI_k$ ) po prolazištima i kumulativni prinos ukupnog izvoda ( $KPUI$ ) iznose:

$$PUI_k = \sum_{i=2}^m o_i^k, 1 \leq k \leq p, KPUI = \sum_{k=1}^p PUI_k, \quad (4.7)$$

dok se prinosi pojedinih frakcija, terminološki definisani kao horizontalni prinosi ( $HP_i$ ), računaju kao:

$$HP_i = \sum_{k=1}^p o_i^k, 2 \leq i \leq m. \quad (4.8)$$

Iz navedenih relacija, može se primetiti da se svaki pojedinačni prinos izvoda, kao i kumulativni prinos ukupnog izvoda može izraziti pomoću poznatog prinosa ukupnog izvoda sa jednog od krupača. Tako je, na primer:

$$\begin{aligned}
 PUI_2 &= (1 - PUI_1) \cdot (1 - b_1^2) \\
 PUI_k &= (1 - PUI_1) \cdot (1 - b_1^k) \cdot \prod_{i=2}^{k-1} b_1^i, \quad 3 \leq k \leq p \\
 KPUI &= 1 - (1 - PUI_1) \cdot \prod_{i=2}^p b_1^i.
 \end{aligned} \tag{4.9}$$

Navedeno znači da će, kada se matrice usitnjavanja koriste u povratnom smeru, vrednost proizvoljno odabranog prinosa ukupnog izvoda sa jednog od krupača odrediti vrednosti prinosa na preostalim krupačima, kao i vrednost kumulativnog prinosa ukupnog izvoda. Štaviše, vrednosti prinosa ukupnog izvoda na svakom od krupača biće direktno određeni odabranim prinosom ukupnog izvoda i prvom vrstom matrice usitnjavanja.

Bez gubitaka na opštosti, može se pretpostaviti da je:

$$b_{11}^1 \leq b_{12}^1 \leq \dots \leq b_{1n}^1, \tag{4.10}$$

što je uvek i dostižno, sa obzirom da je redosled kolona u matrici usitnjavanja  $B^{(1)}$  kao i redosled frakcija ulaznog vektora  $f$  uvek moguće izmeniti. U teorijskom delu (Poglavlje 2.3.4) je pomenuto da je u industriji od velike važnosti da prinosi ukupnog izvoda po prolazištima krupljenja budu u određenim opsezima (Tabela 2.2). Matrice usitnjavanja bi stoga mogle da budu zanimljive za industrijsku upotrebu, jer je njima moguće odrediti opseg vrednosti za prinose ukupnih izvoda po prolazištima krupljenja, kao i za kumulativni prinos ukupnog izvoda koje je moguće ostvariti sa određenom raspodelom veličine čestica frakcija na ulazu.

Na osnovu relacija datih u (4.9), ukoliko je odabran opseg vrednosti za prinos ukupnog izvoda na prvom krupaču, na primer:

$$l \leq PUI_1 \leq d, \tag{4.11}$$

opsezi vrednosti za preostale izvode su jedinstveno određeni. U prethodnoj relaciji (4.11) sa  $l$  i  $d$  su označene minimalna i maksimalna vrednost za prinos ukupnog izvoda. Tada su dopustive vrednosti za ulaze kojima će biti moguće postići željene izlaze date sledećim sistemom linearnih nejednačina:

$$l \leq \sum_{j=1}^{n-1} (b_{1n}^1 - b_{1j}^1) \cdot f_j + 1 - b_{1n}^1 \leq d, \tag{4.12}$$



$$\sum_{j=1}^{n-1} f_j \leq 1,$$

$$f_j \geq 0, 1 \leq j \leq n - 1.$$

Tako, na primer, kada je broj ulaznih frakcija (frakcija zrna različite krupnoće) tri ( $n=3$ ), oblast dopustivih rešenja je geometrijski predstavljena kao oblast ograničena sa tri prave, od kojih su dve prave paralelne i označavaju vrednosti  $l$  i  $d$ . Optimalan slučaj, u smislu da za svaku izabranu vrednost prinosa ukupnog izvoda na prvom krupaču koja pripada intervalu između  $l$  i  $d$  postoji dopustivo rešenje, je:

$$l = 1 - b_{1n}^1, d = 1 - b_{11}^1, \quad (4.13)$$

kada prave koje predstavljaju granice  $l$  i  $d$ , seku x-osu u tačkama 0 i 1, respektivno.

U primerima će se razmotriti mogućnosti za odabir vrednosti prinosa ukupnog izvoda na prolazištima krupljenja. Pored toga, demonstriraće se kako je moguće izračunati vrednosti masenih udela ulaznih frakcija zrna, a time i raspodelu veličina zrna pšenice čijim će se usitnjavanjem dobiti željena vrednost prinosa ukupnog izvoda na prolazištima krupljenja.

Ukoliko je prinos ukupnog izvoda na prvom krupaču ( $PUI_l$ ) neka vrednost u intervalu između vrednosti  $l$  i  $d$  (definisanih sa (4.13)), onda će sledeće ulazne vrednosti masenog udela frakcija zrna pšenice različite krupnoće:

$$f_1 \in \left( \frac{PUI_l - 1 + b_{12}^1}{b_{12}^1 - b_{11}^1}, \frac{PUI_l - 1 + b_{13}^1}{b_{13}^1 - b_{11}^1} \right),$$

$$f_2 = \frac{b_{11}^1 - b_{13}^1}{b_{13}^1 - b_{12}^1} \cdot f_1 + \frac{PUI_l - 1 + b_{13}^1}{b_{13}^1 - b_{11}^1} \quad \text{i} \quad (4.14)$$

$$f_3 = 1 - f_1 - f_2,$$

voditi do željenog prinosa ukupnog izvoda na prvom krupaču ( $PUI_l$ ).

Sa druge strane, ukoliko se postave granice za vrednost prinosa horizontalnih izvoda (odgovarajućih frakcija izvoda):

$$lh_i \leq HP_i \leq dh_i, 2 \leq i \leq m, \quad (4.15)$$

onda se na osnovu relacije:

$$HP_i = \sum_{k=1}^p o_i^k, 2 \leq i \leq m, \quad (4.16)$$

uslov (4.15) može izraziti pomoću masenog udela prve izlazne frakcije:

$$lh_i \leq \left[ b_i^2 + \sum_{k=3}^p \left( b_i^k \cdot \prod_{m=2}^{k-1} b_1^m \right) \right] \cdot o_1^1 + o_i^1 \leq dh_i, 2 \leq i \leq m. \quad (4.17)$$

Pomoću jednačine (4.1) sistem linearnih nejednačina (4.17) može da se izrazi preko ulaznih frakcija, što dalje implicira da je na ovaj način moguće rešiti povratni problem matrica usitnjavanja za izračunavanje vrednosti horizontalnih prinosa. Najsloženiji problem koji će biti diskutovan u okviru primera je slučaj kada su postavljena dva uslova, data sa (4.11) i (4.15). U svim pomenutim situacijama, probleme je moguće posmatrati kao slučajeve linearnog programiranja, sa ili bez funkcije cilja.

#### 4.1.1.2 Primeri primene matrica usitnjavanja za kontrolu prinosa ukupnog izvoda na prolazištima krupljenja

Rezultati prosejavanja mliva dobijenog usitnjavanjem frakcija zrna pšenice različite krupnoće, su prikazani Tabelom 4.1.

**Tabela 4.1.** Maseni udeli frakcija mliva dobijenog usitnjavanjem frakcija zrna pšenice različite krupnoće

Frakcija mliva	Veličina čestica frakcije mliva ( $\mu\text{m}$ )	Maseni udeo frakcije mliva dobijen usitnjavanjem odgovarajuće frakcije zrna		
		j=1 > 2,8·20 mm	j=2 2,8/2,5·20 mm	j=3 < 2,5·20 mm
b <sub>1j</sub> (prelaz krupljevine)	> 1180	0,708	0,731	0,748
b <sub>2j</sub> (krupni griz)	1180 – 530	0,190	0,155	0,132
b <sub>3j</sub> (srednji i sitni griz)	530 – 315	0,033	0,030	0,028
b <sub>4j</sub> (osevci)	315 – 180	0,036	0,033	0,032
b <sub>5j</sub> (brašno)	< 180	0,033	0,051	0,060

\* j označava frakciju usitnjavanog zrna

Rezultati analize sejanja mliva sa prvog krupača dobijenog usitnjavanjem ukupnog polaznog uzorka pšenice i mliva dobijenog usitnjavanjem na drugom i trećem krupaču prikazani su Tabelom 4.2.

Rezultati prikazani u tabelama predstavljaju masene udele dobijenih frakcija mliva nakon usitnjavanja na prolazištima krupljenja. Maseni udeli frakcija prikazani u Tabeli 4.2 izraženi su u odnosu na masu materijala na prvom prolazištu, kao i na masu materijala na odgovarajućem prolazištu (kada je u pitanju prvi krupač, pomenuti maseni udeli su isti).

Na osnovu rezultata iz Tabele 4.1 formirana je matrica usitnjavanja za prvo prolazište krupljenja ( $B^{(1)}$ ), dok su na osnovu rezultata prikazanih u Tabeli 4.2 formirane matrice usitnjavanja za drugo i treće prolazište krupljenja ( $B^{(2)}$  i  $B^{(3)}$ ).

$$B^{(1)} = \begin{bmatrix} 0,708 & 0,731 & 0,748 \\ 0,190 & 0,155 & 0,132 \\ 0,033 & 0,030 & 0,028 \\ 0,036 & 0,033 & 0,032 \\ 0,033 & 0,051 & 0,060 \end{bmatrix}, B^{(2)} = \begin{bmatrix} 0,568 \\ 0,307 \\ 0,021 \\ 0,057 \\ 0,047 \end{bmatrix}, B^{(3)} = \begin{bmatrix} 0,571 \\ 0,263 \\ 0,029 \\ 0,083 \\ 0,054 \end{bmatrix}. \quad (4.18)$$

**Tabela 4.2.** Maseni udeli frakcija dobijeni usitnjavanjem na prvom, drugom i trećem krupaču

Veličina frakcije mliva ( $\mu\text{m}$ )	Maseni udeo frakcija mliva izražen u odnosu na masu materijala koja dolazi na prvi krupač			Maseni udeo frakcija mliva izražen u odnosu na masu materijala koja dolazi na odgovarajući krupač		
	k = 1 prvi krupač	k = 2 drugi krupač	k = 3 treći krupač	Izlazna frakcija	k = 2 drugi krupač	k = 3 treći krupač
> 1180 ( $k^* = 1$ ) > 1000 ( $k = 2-3$ )	0,716	0,407	0,232	$b_1^k$	0,568	0,571
1180 - 530 ( $k = 1$ ) 1000 - 500 ( $k = 2$ ) 1000 - 450 ( $k = 3$ )	0,178	0,220	0,107	$b_2^k$	0,307	0,263
530 - 315 ( $k = 1$ ) 500 - 315 ( $k = 2$ ) 450 - 300 ( $k = 3$ )	0,032	0,015	0,012	$b_3^k$	0,021	0,029
315 - 150 ( $k = 1-2$ ) 300 - 150 ( $k=3$ )	0,035	0,040	0,034	$b_4^k$	0,057	0,083
< 150 ( $k = 1-3$ )	0,039	0,034	0,022	$b_5^k$	0,047	0,054

\*  $k$  označava prolazište krupljenja

### Primer 1

Primer 1 ilustruje direktan smer primene koncepta matrica usitnjavanja na prva tri prolazišta krupljenja. Za datu raspodelu veličine zrna polaznog uzorka pšenice  $f$  na osnovu jednačine (4.1) moguće je odrediti raspodelu veličine čestica mliva sa prvog, drugog i trećeg krupača:

$$f = \begin{bmatrix} 0,705 \\ 0,219 \\ 0,076 \end{bmatrix}$$

$$o^{(1)} = B^{(1)} \cdot f = \begin{bmatrix} 0,708 & 0,731 & 0,748 \\ 0,190 & 0,155 & 0,132 \\ 0,033 & 0,030 & 0,028 \\ 0,036 & 0,033 & 0,032 \\ 0,033 & 0,051 & 0,060 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0,705 \\ 0,219 \\ 0,076 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,716 \\ 0,178 \\ 0,032 \\ 0,035 \\ 0,039 \end{bmatrix},$$

$$o^{(2)} = B^{(2)} \cdot o_1^1 = \begin{bmatrix} 0,568 \\ 0,307 \\ 0,021 \\ 0,057 \\ 0,047 \end{bmatrix} \cdot 0,716 = \begin{bmatrix} 0,407 \\ 0,220 \\ 0,015 \\ 0,040 \\ 0,034 \end{bmatrix} \quad (4.19)$$

$$o^{(3)} = B^{(3)} \cdot o_1^2 = \begin{bmatrix} 0,571 \\ 0,263 \\ 0,029 \\ 0,083 \\ 0,054 \end{bmatrix} \cdot 0,407 = \begin{bmatrix} 0,232 \\ 0,107 \\ 0,012 \\ 0,034 \\ 0,022 \end{bmatrix}.$$

Moguće je primetiti da je:

$$\sum_{i=1}^5 o_i^1 = 1, \sum_{i=1}^5 o_i^2 = o_1^1 = 0,716 \text{ i } \sum_{i=1}^5 o_i^3 = o_1^2 = 0,407.$$

Prelaz krupljavine sa prvog krupača, koji se dobija u prinosu od 71,6% (maseni udeo 0,716), usitnjava se na II krupaču. Prelaz krupljavine sa drugog krupača u prinosu od 40,7% (u odnosu na masu materijala na prvom krupaču) usitnjava se na trećem krupaču. Može se primetiti da navedene vrednosti zapravo odgovaraju vrednostima masenih udela pomenutih frakcija u Tabeli 4.2 u odgovarajućim matricama (4.19) koje opisuju raspodele veličine čestica na prolazištima krupljenja.

Na osnovu relacija (4.7) i (4.8) prinosi ukupnih izvoda na prolazištima krupljenja, kumulativni prinos ukupnog izvoda sa prva tri krupača i horizontalni prinos za sve frakcije mliva iznose:

$$PUI = \begin{bmatrix} 0,284 \\ 0,309 \\ 0,175 \end{bmatrix}, KPUI = 0,768 \text{ i } HP = \begin{bmatrix} 0,232 \\ 0,505 \\ 0,059 \\ 0,109 \\ 0,095 \end{bmatrix}. \quad (4.20)$$

Kao što je navedeno u Teorijskom delu (Poglavlje 2.3.4), izvod na prolazištima prvog kvaliteta u fazi krupljenja čine frakcije mliva koje se izvode iz faze krupljenja, odnosno ne usmeravaju na naredni krupač. Izvod čine frakcije krupnog griza, srednjeg i sitnog griza, osevci i brašno. Zbir masenih udela pomenutih frakcija određuje prinos ukupnog izvoda na posmatranom prolazištu krupljenja, konkretno u datom primeru:

- prvi krupač:  $0,178+0,032+0,035+0,039 = 0,284$ ,
- drugi krupač:  $0,220+0,015+0,040+0,034 = 0,309$  i
- treći krupač:  $0,107+0,012+0,034+0,022 = 0,175$ .

Navedene vrednosti takođe odgovaraju vrednostima masenih udela datih frakcija prikazanih u Tabeli 4.2 i relaciji (4.19). Sa obzirom da elementi matrica zapravo predstavljaju masene udele, vrednosti prinosa ukupnog izvoda na prvom, drugom i trećem prolazištu krupljenja iznose 28,4%, 30,9% i 17,5%, respektivno. Pored toga, moguće je primetiti da najkrupnija frakcija horizontalnog prinosa zapravo predstavlja frakciju prelaza sa trećeg krupača ( $HP_1 = o_1^3$ ), kao i da je zbir horizontalnih prinosa, odnosno zbir prinosa sličnih frakcija izvoda sa različitih prolazišta krupljenja:

- krupni griz:  $0,178+0,220+0,107 = 0,505$ ,
- srednji i sitni griz:  $0,032+0,015+0,012 = 0,059$ ,
- osevci:  $0,035+0,040+0,034 = 0,109$  i
- brašno:  $0,039+0,034+0,022 = 0,095$ .

Takođe zbir prinosa sličnih frakcija izvoda sa različitih prolazišta krupljenja jednak je kumulativnom prinosu ukupnog izvoda, odnosno:

$$\sum_{k=2}^5 HP_k = KPUI = 0,768. \quad (4.21)$$

Ovim primerom ilustrovano je kako je moguće upotrebiti matrice usitnjavanja da bi se predvideli efekti koji promena raspodele veličine zrna pšenice ima na prinose ukupnih izvoda na prolazištima krupljenja, kao i na prinose pojedinačnih frakcija dobijenog mliva, pri konstantnim parametrima mlevenja i prosejavanja. Zbir prinosa ukupnog izvoda sa prva tri prolazišta krupljenja (izražen u odnosu na masu materijala na prvom krupaču) definiše potencijalni prinos brašna koji se može ostvariti u mlinu pri datom vođenju krupljenja. Kao što je u teorijskom delu doktorata (Poglavlje 2.3.4) pomenuto, mogućnost ostvarivanja željenih, unapred definisanih vrednosti prinosa ukupnog izvoda, izuzetno je važno kako bi se osigurao odgovarajući maseni protok frakcija mliva u mlinu. Opseg vrednosti prinosa ukupnog izvoda može da varira od jednog do drugog mlina, u zavisnosti od načina vođenja valjaka i postavljenog dijagrama mlevenja, a literaturni podaci za uobičajene vrednosti prinosa ukupnog izvoda po prolazištima dati su u teorijskom delu (Poglavlje 2.3.4, Tabela 2.2, [21,40,96]).

Narednim primerima ilustrovaće se upotreba matrica usitnjavanja u povratnom smeru. Preciznije, pokazaće se kako se izračunavaju maseni udeli ulaznih frakcija, odnosno raspodela

veličina zrna pšenice, čijim će se usitnjavanjem postići unapred zadani, željeni prinosi ukupnih izvoda.

### Primer 2

Ukoliko se kao željeni prinos ukupnog izvoda na prvom prolazištu krupljenja zada vrednost od 27%, odnosno ukoliko je  $PUI_l=0,27$ , onda će na osnovu relacija datih sa (4.9), prinosi ukupnih izvoda na preostalim prolazištima i kumulativni prinos ukupnog izvoda sa prva tri krupača biti:

$$\begin{aligned} PUI_2 &= (1 - PUI_1) \cdot (1 - b_1^2) = (1 - 0,27) \cdot (1 - 0,568) = 0,315 \\ PUI_3 &= (1 - PUI_1) \cdot (1 - b_1^3) \cdot b_1^2 = (1 - 0,27) \cdot (1 - 0,571) \cdot 0,568 = 0,178 \quad (4.22) \\ KPUI &= 1 - (1 - PUI_1) \cdot b_1^2 \cdot b_1^3 = 1 - (1 - 0,27) \cdot 0,568 \cdot 0,571 = 0,763. \end{aligned}$$

Dalje, na osnovu (4.14) moguće je izračunati opseg za odabir masenog udela ulazne frakcije zrna 1, odnosno  $f_1$ :

$$f_1 \in \left( \frac{PUI_1 - 1 + b_{12}^1}{b_{12}^1 - b_{11}^1}, \frac{PUI_1 - 1 + b_{13}^1}{b_{13}^1 - b_{11}^1} \right) \rightarrow f_1 \in (0,0435 \ 0,4500). \quad (4.23)$$

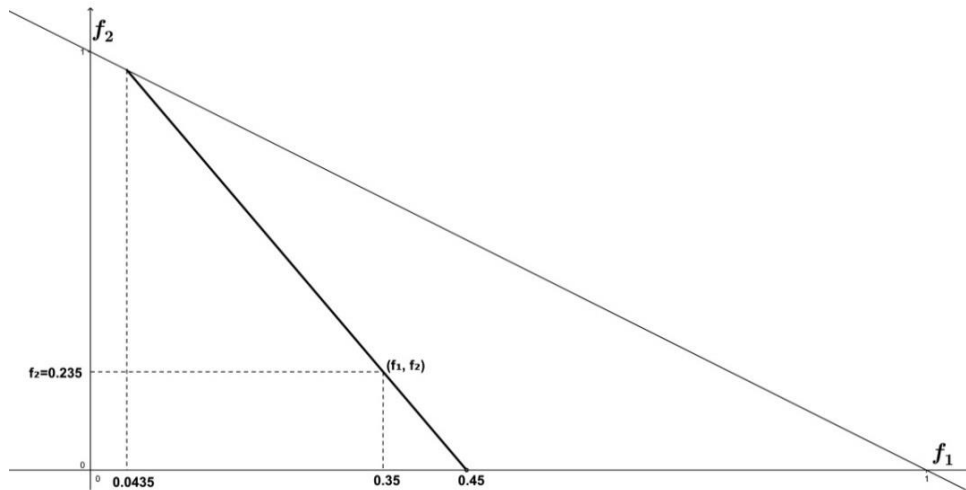
Ukoliko na primer odaberemo željenu vrednost za frakciju  $f_1$  da je 0,35, onda su maseni udeli preostale dve frakcije zrna  $f_2$  i  $f_3$  date sa (4.14) i iznose:

$$\begin{aligned} f_2 &= \frac{b_{11}^1 - b_{13}^1}{b_{13}^1 - b_{12}^1} \cdot f_1 + \frac{PUI_1 - 1 + b_{13}^1}{b_{13}^1 - b_{11}^1} = 0,235 \\ f_3 &= 1 - f_1 - f_2 = 0,415, \end{aligned} \quad (4.24)$$

iz čega sledi da je jedna od mogućih raspodela veličina zrna pšenice koju je potrebno dovesti na prvi krupač, da bi se na prvom prolazištu krupljenja ostvario prinos od 27%:

$$f = \begin{bmatrix} 0,350 \\ 0,235 \\ 0,415 \end{bmatrix}. \quad (4.25)$$

Sve kombinacije ulaznih frakcija  $f_1$  i  $f_2$  koje je moguće dovesti na ulaz da bi se dobio željeni prinos ukupnog izvoda na prvom krupaču od 27% dati sa (4.22) prikazane su zatamnjenom duži na Slici 4.1. Na slici je prikazana i kombinacija rešenja iz (4.25).



**Slika 4.1.** Oblast dopustivih rešenja (Primer 2)

Na osnovu (4.4), (4.8) i (4.25) mogu se izračunati horizontalni prinosi:

$$HP = \begin{bmatrix} 0,237 \\ 0,491 \\ 0,057 \\ 0,110 \\ 0,105 \end{bmatrix} \quad (4.26)$$

Primer 2 ilustruje da su prinosi ukupnog izvoda sa sva tri prolazišta krupljenja, uz kumulativni prinos, određeni elementima prve vrste matrice usitnjavanja prvog krupača i ulaznim vektorom  $f$ . Na primeru je uočljivo da je potrebno samo jedan prinos ukupnog izvoda slobodno odabrati, a da su prinosi na preostalim prolazištima diktirani željenim i odabranim izvodom.

Međutim, nekada je moguće odabrati prinos ukupnog izvoda koji nije ostvariv sa realnim vrednostima masenih udela ulaznih frakcija zrna. Na primer, ukoliko bi ciljani prinos ukupnog izvoda na prvom prolazištu krupljenja bio 32%, odnosno ako je  $PUI_1=0,32$  prinosi ukupnog izvoda na preostalim prolazištima i kumulativni prinos bili bi:  $PUI_2=0,294$ ,  $PUI_3=0,166$  i  $KPUI=0,779$ . U tom slučaju, frakciju zrna  $f_i$  bilo bi neophodno odabrati iz intervala od 1,700 do 2,2174. Fizički, ovaj interval nema smisla, sa obzirom da frakcija  $f_i$  predstavlja maseni udeo date frakcije zrna i mora da se kreće u vrednostima od 0 do 1.

Stoga je neophodno definisati oblast vrednosti prinosa ukupnih izvoda, odabirom iz koje će uvek biti moguće ostvariti željeni prinos sa realnim vrednostima masenih udela ulaznih frakcija zrna pšenice. Ovim problemom detaljnije ćemo se baviti u narednom primeru.

### **Primer 3**

Opseg vrednosti iz kojeg je potrebno odabrati prinos ukupnog izvoda za određeni krupač, a da za to postoje dopustiva rešenja (rešenja takva da postoji kombinacija ulaza gde su maseni udeli sve tri frakcije u opsegu od 0 do 1) direktno je određen članovima prve vrste matrice

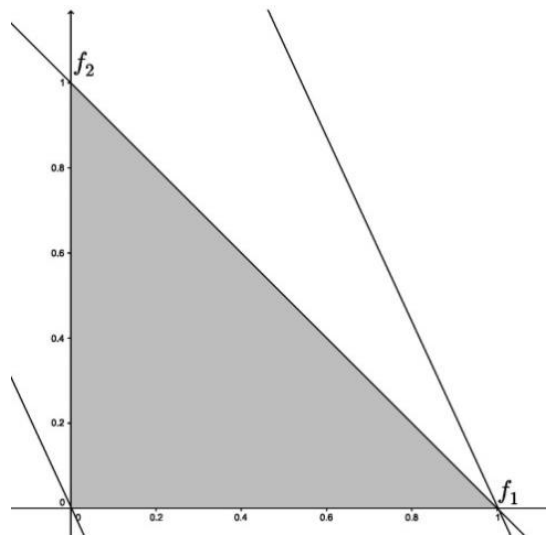
usitnjavanja prvog krupača. Tačnije, određen je prinosom frakcija prelaza krupljavine, a time i prinosom ukupnog izvoda ostvarenog na prvom prolazištu krupljenja. Koristeći (4.13) dobijamo da se prinos ukupnog izvoda na prvom krupaču može odabrati iz opsega:

$$PUI_1 \in (0,252, 0,292). \quad (4.27)$$

Tada je oblast dopustivih rešenja grafički prikazana Slikom 4.2.

Za navedeni slučaj na osnovu Slike 4.2 i uvrštavanjem izračunatih granica za  $PUI_1$  u jednačine date u (4.9) opseg vrednosti prinosa ukupnog izvoda na preostalim krupačima i kumulativnog prinosa iznosiće:

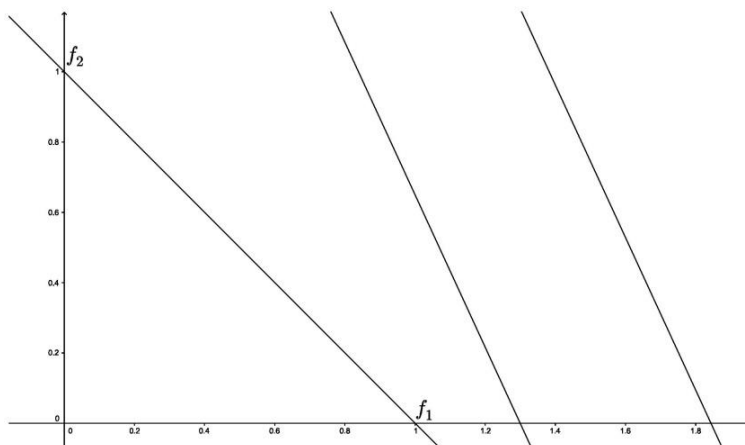
$$PUI_2 \in (0,306, 0,323); PUI_3 \in (0,172, 0,182) \text{ i } KPUI \in (0,757, 0,770). \quad (4.28)$$



**Slika 4.2.** Oblast rešenja u slučaju kada je prinos ukupnog izvoda na prvom krupaču odabran iz dopustivog intervala (Primer 3a)

Odabirom jednog od prinosa ukupnog izvoda sa prva tri prolazišta krupljenja ili kumulativnog prinosa ukupnog izvoda iz navedenih opsega, moguće je naći zadovoljavajuću kombinaciju masenih udela ulaznih frakcija zrna. Može se primetiti da je u Primeru 2 prvobitno odabrani prinos ukupnog izvoda na prvom krupaču bio  $PUI_1=0,27$ , odnosno bio je u okviru dozvoljenog opsega za  $PUI_1$  (videti 4.27). Na primeru je pokazano da je moguće pronaći rešenje za tako odabran prinos (4.25). Međutim, kada je prinos odabran van preporučenog intervala (što je urađeno u drugom delu Primera 2), odnosno kada je odabrani prinos ukupnog izvoda iznosio  $PUI_1=0,32$ , nije bilo moguće pronaći zadovoljavajuće rešenje, odnosno odgovarajuću kombinaciju masenih udela frakcija zrna. Ovakav slučaj prikazan je Slikom 4.3, na kojoj se vidi da nema preseka u okviru dopustive oblasti za odabir frakcija ulaza.



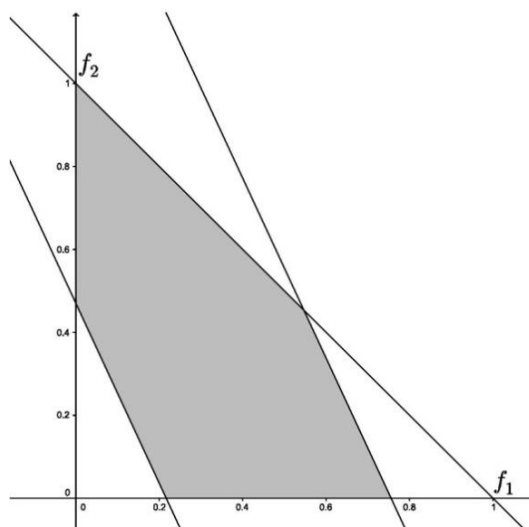


**Slika 4.3.** Oblast rešenja u slučaju kada je prinos ukupnog izvoda na prvom krupaču odabran van dopustivog intervala (Primer 3b)

Sa druge strane, ukoliko se interval dopustivih rešenja za prinos ukupnog izvoda na prvom krupaču suzi, na primer ukoliko odaberemo da je:

$$PUI_1 \in (0,26, 0,28) \quad (4.29)$$

smanjuje se i oblast prihvatljivih rešenja za ulazne frakcije (Slika 4.4).



**Slika 4.4.** Oblast rešenja u slučaju kada je prinos ukupnog izvoda na prvom krupaču odabran iz suženog intervala (Primer 3c)

Ranije je pomenuto da je neophodno prinose ukupnog izvoda držati u određenim opsezima vrednosti, kako bi oprema u mlinu (mlinski valjci, planska sita, čistilice griza, uključujući i transportnu opremu (pneumatske uzvlake)) koja se koristi u postupku dobijanja pšeničnog brašna radila odgovarajućim kapacitetom, odnosno pri projektovanom specifičnom opterećenju. Kao primer koji ilustruje navedenu tvrdnju, Fowler [96] navodi mlin u kojem

prvi krupač radi kapacitetom od 20 tona na sat. Ukoliko je ciljani prinos ukupnog izvoda na njemu 30%, promena izvoda od 5% uticaće da oko tona materijala po času bude preusmerena na neku drugu pasažu, a ne onu predviđenu prvobitnom postavkom dijagrama mlevenja.

Međutim, i u slučajevima kada je prinos ukupnog izvoda odgovarajući, da bi oprema u mlinu radila u skladu sa projektovanim kapacitetom neophodno je obratiti pažnju da prinos pojedinačnih frakcija koje čine izvod bude odgovarajući. Posmatrano sa aspekta matrica usitnjavanja to znači da je u određenim slučajevima neophodno i da uz vrednosti prinosa ukupnih izvoda sa pojedinačnih prolazišta i horizontalni prinosi, odnosno prinosi pojedinih frakcija izvoda, budu u odgovarajućim opsezima. Ovim slučajem bavi se Primer 5. Pre toga će se, u Primeru 4, ilustrovati kako je moguće u povratnom problemu pronaći raspodelu veličina zrna pšenice koja će voditi do zahtevanih vrednosti za horizontalne prinose.

#### **Primer 4**

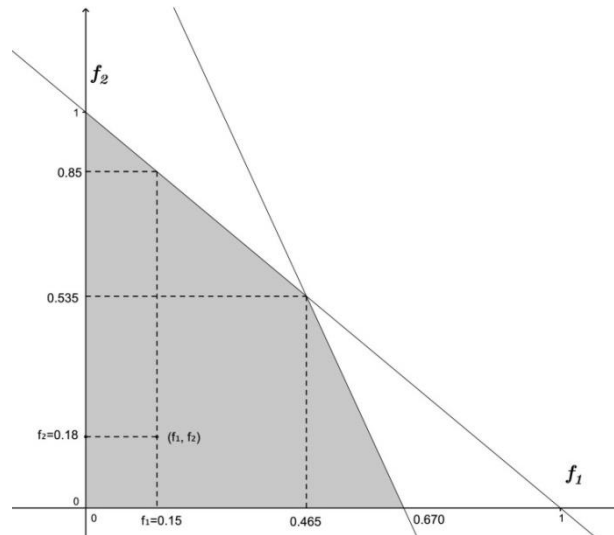
Ukoliko se postavi zahtev da kumulativni prinosi frakcija izvoda (uz prinos prelaza krupljavine sa trećeg krupača), nakon usitnjavanja na prva tri prolazišta krupljenja budu u sledećim intervalima:

- prinos prelaza krupljavine sa trećeg krupača:  $HP_1 = 20 - 25\%$ ,
- prinos krupnog griza:  $HP_2 = 50 - 55\%$ ,
- prinos srednjeg i sitnog griza:  $HP_3 = 5 - 12\%$ ,
- prinos osevaka:  $HP_4 = 5 - 12\%$  i
- prinos brašna:  $HP_5 = 5 - 12\%$ ,

u povratnom smeru matrica usitnjavanja, sistem nejednačina (4.17) postaje:

$$\begin{aligned}
 -0,0426 &\leq -0,0130 \cdot f_1 - 0,0055 \cdot f_2 \leq 0,0074 \\
 0,0266 &\leq 0,0397 \cdot f_1 + 0,0152 \cdot f_2 \leq 0,0766 \\
 -0,0060 &\leq 0,0035 \cdot f_1 + 0,0014 \cdot f_2 \leq 0,0640 \\
 -0,0599 &\leq -0,0002 \cdot f_1 - 0,0008 \cdot f_2 \leq 0,0101 \\
 -0,0681 &\leq -0,301 \cdot f_1 - 0,0103 \cdot f_2 \leq 0,0019
 \end{aligned}
 \tag{4.30}$$

što se grafički može prikazati kao oblast dopustivih rešenja (Slika 4.5).



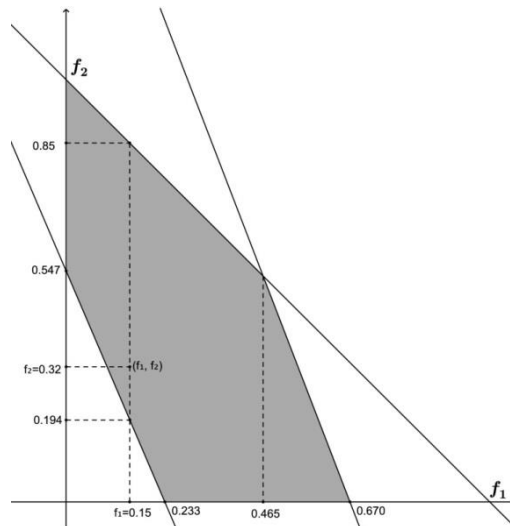
**Slika 4.5.** Oblast rešenja u slučaju zadanog opsega za horizontalne prinose (Primer 4)

Na slici je moguće primetiti da je samo jedna prava, konkretno – druga prava iz 4.30 – uticala na formiranje oblasti dopustivih rešenja, dok ostale nisu uticale na oblast, pa nisu ni prikazane na grafiku. Takođe, može se primetiti da su za ulaz dat sa (4.19), horizontalni prinosi u okviru predviđenog intervala (4.20). Sa grafika se može primetiti da ukoliko je maseni udeo frakcije zrna 1 u opsegu  $f_1 \in (0, 0,465)$ , onda maseni udeo frakcije zrna 2 u intervalu  $f_2 \in (0, 1 - f_1)$ , dok za  $f_1 \in (0,465, 0,670)$ ,  $f_2 \in (0, 1,747 - 2,608 \cdot f_1)$ . Na primer, ukoliko odaberemo da je  $f_1 = 0,15$ , onda će  $f_2$  biti neka od vrednosti iz intervala od 0 do 0,85. Ukoliko odaberemo da je  $f_2 = 0,18$ ,  $f_3$  je automatski određen kao dopuna do 1 i iznosi 0,67. Prinosi ukupnih izvoda po prolazištima, kumulativni prinos ukupnog izvoda i horizontalni prinosi tada bi iznosili:

$$PUI = \begin{bmatrix} 0,261 \\ 0,319 \\ 0,180 \end{bmatrix}, KPUI = 0,76 \text{ i } HP = \begin{bmatrix} 0,240 \\ 0,479 \\ 0,051 \\ 0,119 \\ 0,111 \end{bmatrix}. \quad (4.31)$$

### Primer 5

Konačno, ukoliko se istovremeno postave ograničenja za odabir prinosa ukupnog izvoda na prvom prolazištu krupljenja  $PUI_1 \in (0,250, 0,350)$  i za odabir horizontalnih prinosa kao u primeru 4, oblast dopustivih rešenja može se prikazati sledećom slikom (Slika 4.6).



**Slika 4.6.** Oblast rešenja u slučaju zadatog opsega za prinos na prvom krupaču i za horizontalne prinose (Primer 5)

U ovom slučaju je oblast sužena u odnosu na oblast iz prethodnog primera (Slika 4.5), što je rezultat dodavanja novog uslova. Sa grafika (4.6) se može primetiti da ukoliko  $f_1 \in (0, 0,233)$ , onda  $f_2 \in (0,547 - 2,353 \cdot f_1, 1 - f_1)$ , ukoliko  $f_1 \in (0,233, 0,465)$ ,  $f_2 \in (0 - 1 - f_1)$  i ukoliko  $f_1 \in (0,465, 0,670)$ ,  $f_2 \in (0,1747 - 2,608 \cdot f_1)$ . Na primer, ako odaberemo da je  $f_1=0,15$ , onda će  $f_2$  biti neka od vrednosti iz intervala od 0,194 do 0,85 (pogledati sliku 4.6). Ukoliko odaberemo da  $f_2=0,32$ ,  $f_3$  je automatski određen kao dopuna do 1 i iznosi 0,53. Prinosi ukupnih izvoda po prolazištima, kumulativni prinos ukupnog izvoda i horizontalni prinosi tada bi iznosili:

$$PUI = \begin{bmatrix} 0,263 \\ 0,318 \\ 0,179 \end{bmatrix}, KPUI = 0,76 \text{ i } HP = \begin{bmatrix} 0,239 \\ 0,484 \\ 0,057 \\ 0,110 \\ 0,110 \end{bmatrix}. \quad (4.32)$$

## 4.1.2 Prva B faza

### 4.1.2.1 Teorijski deo

Neka je sa B označena matrica usitnjavanja dimenzija  $m \times n$ :

$$B = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \cdots & b_{1n} \\ b_{21} & b_{22} & \cdots & b_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ b_{m1} & b_{m2} & \cdots & b_{mn} \end{bmatrix}. \quad (4.33)$$

Podsetimo se, u teorijskom delu (u okviru poglavlja 2.4.1.2, jednačine 2.13 i 2.30) je istaknuto da se matricna jednačina koja predstavlja postupak usitnjavanja može se zapisati kao:

$$\begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \cdots & b_{1n} \\ b_{21} & b_{22} & \cdots & b_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{m1} & b_{m2} & \cdots & b_{mn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \vdots \\ f_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} o_1 \\ o_2 \\ \vdots \\ o_m \end{bmatrix}, \quad (4.34)$$

dok se sa:

$$\begin{bmatrix} \frac{Y_{11}}{o_1} & \frac{Y_{12}}{o_1} & \cdots & \frac{Y_{1n}}{o_1} \\ \frac{Y_{21}}{o_2} & \frac{Y_{22}}{o_2} & \cdots & \frac{Y_{2n}}{o_2} \\ \frac{Y_{31}}{o_3} & \frac{Y_{32}}{o_3} & \cdots & \frac{Y_{3n}}{o_3} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{Y_{m1}}{o_m} & \frac{Y_{m2}}{o_m} & \cdots & \frac{Y_{mn}}{o_m} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} f_1 \cdot P_1 \\ f_2 \cdot P_2 \\ \vdots \\ f_n \cdot P_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ \vdots \\ p_m \end{bmatrix}. \quad (4.35)$$

može predstaviti opšti oblik matrice za predviđanje sadržaja neke hemijske komponente u frakcijama izlaza.

Kao što je pokazano primerima obrađenim u prvoj A fazi, za poznatu raspodelu veličine zrna na ulazu  $f = (f_1, f_2, \dots, f_n)$ , moguće je odrediti raspodelu veličina čestica na izlazu (mliva)  $o = (o_1, o_2, \dots, o_m)$  na osnovu poznate matrice usitnjavanja. Sa obzirom da kolone matrice usitnjavanja  $B$ , kao i vektori  $f$  i  $o$  predstavljaju raspodelu veličine čestica, važe isti uslovi koji su navedeni u prvom primeru:

$$\sum_{j=1}^n f_j = 1, \quad \sum_{i=1}^m o_i^1 = 1 \quad i \quad \sum_{i=1}^m b_{ij}^1 = 1, \quad 1 \leq j \leq n. \quad (4.36)$$

Dok se u direktnom smeru, kako je pokazano prvim primerom u okviru prve A faze elementi vektora izlaza računaju na osnovu opšte matrice jednačine (4.34):

$$o_i = \sum_{j=1}^n b_{ij} f_j, \quad 1 \leq i \leq m. \quad (4.37)$$

Iz (4.36) i (4.37) sledi da je:

$$\min_{1 \leq j \leq n} b_{ij} \leq o_i \leq \max_{1 \leq j \leq n} b_{ij}, \quad 1 \leq i \leq m. \quad (4.38)$$

Značenje uslova (4.38) u fizičkom, odnosno praktičnom, smislu je da maseni udeo bilo koje od frakcija izlaza ( $o_i$ ) mora biti neka vrednost u opsegu između minimalne i maksimalne vrednosti elemenata odgovarajuće vrste u matrici usitnjavanja.

Ukoliko se sa  $P$  označi udeo neke hemijske komponente u frakcijama ulaza (frakcije zrna različite krupnoće), a sa  $p$  udeo iste te komponente u frakciji izlaza (frakcije mliva), važi sledeća relacija:

$$\sum_{i=1}^m b_{ij} \cdot p_{ij} = P_j, \quad 1 \leq j \leq n.$$

Maseni udeo hemijske komponente u nekoj od frakcija izlaza (dobijene usitnjavanjem odgovarajuće frakcije ulaza) u odnosu na sadržaj posmatrane hemijske komponente u ulaznom materijalu može se izračunati pomoću sledeće relacije:

$$Y_{ij} = \frac{b_{ij} \cdot p_{ij}}{P_j}, \quad 1 \leq i \leq m, \quad 1 \leq j \leq n,$$

gde je:

$$\sum_{i=1}^m Y_{ij} = 1, \quad 1 \leq j \leq n. \quad (4.39)$$

Fiksirani elementi  $Y_{ij}$  podeljeni sa masenim udelom odgovarajuće frakcije izlaza ( $o_i$ ) formiraju elemente matrice  $Y$ , matrice usitnjavanja za predviđanje sadržaja neke hemijske komponente u frakcijama izlaza ( $p_i$ ):

$$Y = \begin{bmatrix} Y_{11}/o_1 & Y_{12}/o_1 & \cdots & Y_{1n}/o_1 \\ Y_{21}/o_2 & Y_{22}/o_2 & \cdots & Y_{2n}/o_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Y_{m1}/o_m & Y_{m2}/o_m & \cdots & Y_{mn}/o_m \end{bmatrix}. \quad (4.40)$$

Zamenom odgovarajućih elemenata iz matrice jednačina (4.34 i 4.35), dobija se sledeća matrice jednačina:

$$\begin{bmatrix} b_{11} \cdot p_1 - Y_{11} \cdot P_1 & b_{12} \cdot p_1 - Y_{12} \cdot P_2 & \cdots & b_{1n} \cdot p_1 - Y_{1n} \cdot P_n \\ b_{21} \cdot p_2 - Y_{21} \cdot P_1 & b_{22} \cdot p_2 - Y_{22} \cdot P_2 & \cdots & b_{2n} \cdot p_2 - Y_{2n} \cdot P_n \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ b_{m1} \cdot p_m - Y_{m1} \cdot P_1 & b_{m2} \cdot p_m - Y_{m2} \cdot P_2 & \cdots & b_{mn} \cdot p_m - Y_{mn} \cdot P_n \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \vdots \\ f_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.41)$$

gde je:

$$\min_{1 \leq j \leq n} \frac{Y_{ij} P_j}{b_{ij}} \leq p_i \leq \max_{1 \leq j \leq n} \frac{Y_{ij} P_j}{b_{ij}}, \quad 1 \leq i \leq m. \quad (4.42)$$

Praktično, uslov (4.42) se tumači tako da koncentracija neke hemijske komponente ( $p_i$ ) u frakcijama izlaza mora biti neka vrednost u opsegu između minimalne i maksimalne vrednosti elemenata odgovarajuće vrste u matrici usitnjavanja.

Na osnovu relacije (4.41), za date vrednosti ulaza  $f_1, f_2, \dots, f_n$ , koncentracija neke hemijske komponente u frakcijama izlaza može se izračunati na sledeći način:

$$p_i = \frac{\sum_{j=1}^n Y_{ij} P_j f_j}{\sum_{j=1}^n b_{ij} f_j}, \quad 1 \leq i \leq m. \quad (4.43)$$

Povratni problem, u ovom kontekstu, podrazumeva izračunavanje raspodele veličine zrna koja istovremeno vodi i do željene raspodele veličine čestica mliva, ali i do željene koncentracije hemijske komponente u frakcijama mliva. Ovakva izračunavanja je moguće sprovesti na osnovu direktne veze između vrednosti  $p_i$  i  $o_i$ , date sa (4.35). Tri su moguća problema koje je potrebno razmotriti:

- (A) kako odrediti odgovarajuću raspodelu veličine čestica ulaza čijim će se usitnjavanjem dobiti zahtevana raspodela veličine čestica izlaza;
- (B) kako odrediti odgovarajuću raspodelu veličine čestica ulaza čijim će se usitnjavanjem dobiti zahtevana koncentracija hemijske komponente u frakcijama izlaza i
- (C) kako odrediti odgovarajuću raspodelu veličine čestica ulaza čijim će se usitnjavanjem dobiti zahtevana raspodela veličine čestica izlaza i koncentracija hemijske komponente u frakcijama izlaza.

Za slučaj (A) za odabrane frakcije izlaza moguće je korišćenjem relacije (4.34) pronaći kombinaciju ulaznih frakcija, a na osnovu (4.35) je određena koncentracija hemijske komponente u frakcijama izlaza je određena. Problem je analogan studiji koju su sprovedi Fišteš i saradnici [123,124] gde su, na osnovu broja ulaznih ( $n$ ) i izlaznih ( $m$ ) frakcija posmatrana tri slučaja:

- 1)  $m = n$ ,
- 2)  $m < n$ , i
- 3)  $m > n$ .

U prvom slučaju, za zadatu frakciju izlaza  $o_i, 1 \leq i \leq m$ , upotrebom povratne matrice usitnjavanja moguće je doći do jedinstvenog rešenja za raspodelu veličine čestica na ulazu. U drugom slučaju, moguće je pronaći beskonačan broj rešenja za zadati izlaz  $o_i, 1 \leq i \leq m$ . Najzanimljiviji slučaj sa praktičnog, ali i matematičkog stanovišta je treći (sa većim brojem izlaznih nego ulaznih frakcija) u kom je posmatran predeterminisani sistem linearnih jednačina. Dalje će se razmatrati upravo navedeni slučaj.

Razmatrajući ovaj problem, Fišteš i saradnici [123,124] predložili su dva pristupa za rešavanje. Prvi je nazvan precizan pristup (eng. *precision approach*), a drugi približan pristup (eng. *approximation approach*). U preciznom pristupu za proizvoljno odabrane  $n - 1$  frakcije izlaza moguće je pronaći jedinstveno rešenje za frakcije ulaza  $f_j, 1 \leq j \leq n$ . Preostale frakcije izlaza i sadržaj određene hemijske komponente u njima su određene dobijenim vektorom ulaza i matricom usitnjavanja.

U svim pomenutim slučajevima, neophodno je obratiti pažnju na uslov  $f_j, 1 \leq j \leq n$ , koji nalaže pozitivne vrednosti za frakcije ulaza, sa obzirom da one predstavljaju masene udele

frakcija. Stoga je potrebno pronaći opseg za odabir željenih izlaza koje je moguće ostvariti pozitivnim rešenjima.

U slučaju pod B) korišćenjem relacije (4.41), ulazne frakcije je moguće izraziti kao nelinearne funkcije sadržaja neke hemijske komponente u frakcijama izlaza:

$$f_j = F_j(p_1, p_2, \dots, p_{n-1}), \quad j = 1, 2, \dots, n-1, \quad f_n = 1 - \sum_{j=1}^{n-1} f_j. \quad (4.44)$$

Tada su prihvatljive vrednosti za sadržaj komponenata dati sistemom od  $n$  nelinearnih nejednačina:

$$F_j(p_1, p_2, \dots, p_{n-1}) \geq 0, \quad j = 1, 2, \dots, n-1, \quad (4.45)$$

$$\sum_{j=1}^{n-1} F_j(p_1, p_2, \dots, p_m) \leq 1.$$

Iz skupa  $\{p_1, p_2, \dots, p_m\}$ , moguće je proizvoljno odabrati  $n-1$  vrednost za sadržaj neke hemijske komponente u frakciji izlaza.

Funkcije definisane sa (4.44), za slučaj kada su dimenzije matrica (4.33) i (4.40)  $m \times 3$  su:

$$f_1(p_1, p_2) = \frac{A_{12}p_1p_2 + A_1p_1 + A_2p_2 + A_0}{B_{12}p_1p_2 + B_1p_1 + B_2p_2 + B_0},$$

$$f_2(p_1, p_2) = \frac{C_{12}p_1p_2 + C_1p_1 + C_2p_2 + C_0}{B_{12}p_1p_2 + B_1p_1 + B_2p_2 + B_0}, \quad (4.46)$$

$$f_3(p_1, p_2) = \frac{(B_{12} - A_{12} - C_{12})p_1p_2 + (B_1 - A_1 - C_1)p_1 + (B_2 - A_2 - C_2)p_2 + B_0 - A_0 - C_0}{B_{12}p_1p_2 + B_1p_1 + B_2p_2 + B_0},$$

gde su koeficijenti, izraženi preko elemenata matrica B i Y i sadržaja pepela u frakcijama ulaza:

$$\begin{aligned} A_{12} &= b_{12}b_{23} - b_{13}b_{22}, & A_1 &= b_{13}Y_{22}P_2 - b_{12}Y_{23}P_3, \\ A_2 &= b_{22}Y_{13}P_3 - b_{23}Y_{12}P_2, & A_0 &= P_2P_3(Y_{12}Y_{23} - Y_{13}Y_{22}), \\ C_{12} &= b_{13}b_{21} - b_{11}b_{23}, & C_1 &= b_{11}Y_{23}P_3 - b_{13}Y_{21}P_1, \\ C_2 &= b_{23}Y_{11}P_1 - b_{21}Y_{13}P_3, & C_0 &= P_1P_3(Y_{13}Y_{21} - Y_{11}Y_{23}), \\ B_{12} &= b_{11}(b_{22} - b_{23}) + b_{12}(b_{23} - b_{21}) + b_{13}(b_{21} - b_{22}), \\ B_1 &= P_1Y_{21}(b_{12} - b_{13}) + P_2Y_{22}(b_{13} - b_{11}) + P_3Y_{23}(b_{11} - b_{12}), \\ B_2 &= P_1Y_{11}(b_{23} - b_{22}) + P_2Y_{12}(b_{21} - b_{23}) + P_3Y_{13}(b_{22} - b_{21}), \\ B_0 &= P_2P_3(Y_{12}Y_{23} - Y_{13}Y_{22}) + P_1P_3(Y_{13}Y_{21} - Y_{11}Y_{23}) + P_1P_2(Y_{11}Y_{22} - Y_{12}Y_{21}). \end{aligned} \quad (4.47)$$

Sada se sistem (4.45) sastoji od tri nelinearne nejednačine:

$$f_1(p_1, p_2) \geq 0, \quad (4.48)$$



$$f_2(p_1, p_2) \geq 0 \text{ i}$$

$$f_1(p_1, p_2) + f_2(p_1, p_2) \leq 1$$

sa trodimenzionalnom oblasti za prihvatljiva rešenja za sadržaj neke hemijske komponente.

Kao što je predočeno od strane Fišteša i saradnika [124] vrednosti za  $o_1$  i  $o_2$  umesto simultano, mogu da se biraju i pojedinačno. Primenom ovog principa, a na osnovu (4.42), odabirom vrednosti za  $p_1$  definiše se dopustiv opseg vrednosti za  $p_2$ , koji se dobija kao sistem rešenja (4.48), a grafički je prikazan dvodimenzionalnom oblašću.

Opseg vrednosti za odabir vrednosti  $p_2$  može da se odredi i na drugi način. Ukoliko se odabrana vrednost za  $p_1$  zameni u matricnu jednačinu (4.41) dobija se linearna zavisnost između  $f_1$  i  $f_2$ . Presek ove prave sa osom koja određuje vrednost za  $f_1$ , i pravom  $f_1 + f_2 = 1$  definiše dopustivi opseg  $(a, b)$  za odabir vrednosti  $f_1$ . Dalje se posmatra funkcija  $f_1 = F_1(p_1, p_2)$  za poznato  $p_1$ . Ukoliko je funkcija monotona na intervalu  $(a, b)$ , onda vrednosti  $a$  i  $b$  definišu opseg prihvatljivih vrednosti za  $p_2$ .

U slučaju (C), sa (4.34) i (4.41), maseni udeo frakcija ( $f$ ) može se izraziti pomoću masenog udela izlaznih frakcija ( $o$ ) i sadržajem komponente u izlaznim frakcijama ( $p$ ) sledećim nelinearnim funkcijama:

$$f_j = F_j(o_1, o_2, \dots, o_k, p_1, p_2, \dots, p_s), \quad j = 1, 2, \dots, n-1, f_n = 1 - \sum_{j=1}^{n-1} f_j, \quad (4.49)$$

gde je  $k + s = n - 1$ . Rešenje (prihvatljive vrednosti za masene udele frakcija izlaza i sadržaj hemijskih komponenata u njima) se dobija iz sistema od  $n$  nelinearnih nejednačina:

$$F_j(o_1, o_2, \dots, o_k, p_1, p_2, \dots, p_s) \geq 0, \quad j = 1, 2, \dots, n-1, \quad (4.50)$$

$$\sum_{j=1}^{n-1} F_j(o_1, o_2, \dots, o_k, p_1, p_2, \dots, p_s) \leq 1.$$

Neka je dimenzija matrice usitnjavanja  $m \times 3$ . Na osnovu (4.34) i (4.41) ulazne frakcije mogu se izraziti kao nelinearne funkcije koje zavise od vrednosti  $o_1$  i  $p_1$ :

$$f_1(o_1, p_1) = A_{11}o_1p_1 + A_1o_1 + A_0, \quad (4.51)$$

$$f_2(o_1, p_1) = B_{11}o_1p_1 + B_1o_1 + B_0,$$

gde su koeficijenti, izraženi preko elemenata matrica B i Y i sadržaja pepela u frakcijama ulaza:

$$A_{11} = \frac{b_{12} - b_{13}}{Y_{11}P_1(b_{12} - b_{13}) - Y_{12}P_2(b_{11} - b_{13}) + Y_{13}P_3(b_{11} - b_{12})}, \quad (4.52)$$

$$\begin{aligned}
A_1 &= \frac{Y_{13}P_3 - Y_{12}P_2}{Y_{11}P_1(b_{12} - b_{13}) - Y_{12}P_2(b_{11} - b_{13}) + Y_{13}P_3(b_{11} - b_{12})}, \\
A_0 &= \frac{Y_{12}P_2b_{13} - Y_{13}P_3b_{12}}{Y_{11}P_1(b_{12} - b_{13}) - Y_{12}P_2(b_{11} - b_{13}) + Y_{13}P_3(b_{11} - b_{12})}, \\
B_{11} &= \frac{b_{13} - b_{11}}{Y_{11}P_1(b_{12} - b_{13}) - Y_{12}P_2(b_{11} - b_{13}) + Y_{13}P_3(b_{11} - b_{12})}, \\
B_1 &= \frac{Y_{11}P_1 - Y_{13}P_3}{Y_{11}P_1(b_{12} - b_{13}) - Y_{12}P_2(b_{11} - b_{13}) + Y_{13}P_3(b_{11} - b_{12})}, \\
B_0 &= \frac{Y_{13}P_3b_{11} - Y_{11}P_1b_{13}}{Y_{11}P_1(b_{12} - b_{13}) - Y_{12}P_2(b_{11} - b_{13}) + Y_{13}P_3(b_{11} - b_{12})}.
\end{aligned}$$

Tada su prihvatljive vrednosti za  $o_1$  i  $p_1$  predstavljene trodimenzionalno, kao rešenje sistema tri nelinearne nejednačine:

$$\begin{aligned}
f_1(o_1, p_1) &\geq 0, \\
f_2(o_1, p_1) &\geq 0 \text{ i} \\
f_1(o_1, p_1) + f_2(o_1, p_1) &\leq 1.
\end{aligned} \tag{4.53}$$

Ako se vrednost za  $o_1$  bira u skladu sa (4.38), tada (4.53) postaje sistem od tri linearne nejednačine, koji se može prikazati u dve dimenzije, gde presek pravi sa osom koja predstavlja vrednost za  $p_1$  definiše oblast za odabir prihvatljivih rešenja za  $p_1$ .

Alternativni pristup je da se odabere vrednost za  $o_1$  i da se na osnovu jednačine (4.34) dobije linearna veza između ulaznih frakcija:

$$f_2 = \frac{b_{11} - b_{13}}{b_{13} - b_{12}} \cdot f_1 + \frac{o_1 - b_{13}}{b_{12} - b_{13}}. \tag{4.54}$$

Iz jednačine (4.41) sledi da je:

$$\begin{aligned}
p_1 &= \frac{Y_{11}P_1(b_{12} - b_{13}) + Y_{12}P_2(b_{13} - b_{11}) + Y_{13}P_3(b_{11} - b_{12})}{o_1(b_{12} - b_{13})} \cdot f_1 \\
&+ \frac{Y_{12}P_2(o_1 - b_{13}) + Y_{13}P_3(b_{12} - o_1)}{o_1(b_{12} - b_{13})}.
\end{aligned} \tag{4.55}$$

Presek prave (4.54) sa osom koja predstavlja vrednosti za  $f_1$  i pravom  $f_1 + f_2 = 1$  definiše dopustivi opseg  $(a, b)$ , za  $f_1$ :

$$a = \max\left\{0, \frac{o_1 - b_{12}}{b_{11} - b_{12}}\right\}, \quad b = \min\left\{\frac{o_1 - b_{13}}{b_{11} - b_{13}}, 1\right\}. \tag{4.56}$$

Zamenom vrednosti  $a$  i  $b$  za  $f_1$  u (4.55), dobija se dopustiva oblast rešenja za  $p_1$ .

Takođe, na osnovu (4.42), moguće je odabrati vrednost  $p_1$  i vrednosti  $f_1$  i  $f_2$  izraziti kao funkciju  $o_1$ :

$$f_1(o_1) = A_1 o_1 + A_0, \quad f_2(o_1) = B_1 f_1(o_1) + B_0, \quad f_3(o_1) = 1 - f_1(o_1) - f_2(o_1), \quad (4.57)$$

gde su koeficijenti, izraženi preko elemenata matrica B i Y i sadržaja pepela u frakcijama ulaza:

$$\begin{aligned} A_1 &= \frac{(b_{12} - b_{13})p_1 + Y_{13}P_3 - Y_{12}P_2}{Y_{11}P_1(b_{12} - b_{13}) + Y_{12}P_2(b_{13} - b_{11}) + Y_{13}P_3(b_{11} - b_{12})}, \\ A_0 &= \frac{Y_{12}P_2 b_{13} - Y_{13}P_3 b_{12}}{Y_{11}P_1(b_{12} - b_{13}) + Y_{12}P_2(b_{13} - b_{11}) + Y_{13}P_3(b_{11} - b_{12})}, \\ B_1 &= \frac{(b_{13} - b_{11})p_1 + Y_{11}P_1 - Y_{13}P_3}{(b_{12} - b_{13})p_1 + Y_{13}P_3 - Y_{12}P_2}, \\ B_0 &= \frac{Y_{13}P_3 - b_{13}p_1}{(b_{12} - b_{13})p_1 + Y_{13}P_3 - Y_{12}P_2}, \end{aligned} \quad (4.58)$$

a uslovi  $f_1(o_1) \geq 0$ ,  $f_2(o_1) \geq 0$  i  $f_1(o_3) \geq 0$  definišu oblast prihvatljivih rešenja za  $o_1$ .

Slično tome, prave:

$$f_2 = B_1 f_1 + B_0 \text{ i } f_2 = 1 - f_1, \quad (4.59)$$

određuju opseg prihvatljivih vrednosti za  $f_1$  koji dalje definiše opseg prihvatljivih vrednosti za  $o_1$  na osnovu relacije:

$$o_1(f_1) = \frac{1}{A_1} f_1 - \frac{A_0}{A_1}. \quad (4.60)$$

Sa druge strane, u okviru približnog pristupa moguće je zadati sve izlazne frakcije (slučaj A), sadržaj hemijske komponente u svim frakcijama izlaza (slučaj B) ili kombinaciju prethodna dva (slučaj C) i odrediti najpribližnije moguće rešenje. Tada se, u opštem slučaju, posmatra predeterminisan sistem dat u matricnoj formi:

$$C_{m \times n} \cdot X_{n \times 1} = D_{m \times 1}. \quad (4.61)$$

Koristeći semilog normu [137] dobija se:

$$\|D - C \cdot X\|_{semilog} = \sum_{i=1}^m \frac{D_i - C_i \cdot X}{C_i \cdot X} \cdot \log \frac{D_i}{C_i \cdot X}, \quad (4.62)$$

gde je sa  $C_i$  označena  $i$ -ta vrsta matrice  $C$ , koja se može upotrebiti da se pronađe pozitivno rešenje u povratnom linearnom problemu. Slučajevi koji su razmatrani odnosili su se na

situaciju kada je dimenzija matrice usitnjavanja  $m \times 3$ . Uzimajući u obzir opštu matričnu jednačinu (4.34), u slučaju A, koristi se sledeća norma:

$$\sum_{i=1}^m \frac{o_i - B_i \cdot f}{B_i \cdot f} \cdot \log \frac{o_i}{B_i \cdot f} \quad (4.63)$$

U slučaju B, na osnovu relacije (4.35) definisana je semilog norma:

$$\sum_{i=1}^m \frac{B_i - A1_i \cdot f_1 - A2_i \cdot f_2}{A1_i \cdot f_1 + A2_i \cdot f_2} \cdot \log \frac{B_i}{A1_i \cdot f_1 + A2_i \cdot f_2}, \quad (4.64)$$

gde je:

$$\begin{aligned} A1_i &= b_{i1} \cdot p_i - Y_{i1} \cdot P_1 - b_{i3} \cdot p_i + Y_{i3} \cdot P_3, \\ A2_i &= b_{i2} \cdot p_i - Y_{i2} \cdot P_2 - b_{i3} \cdot p_i + Y_{i3} \cdot P_3, \\ B_i &= -b_{i3} \cdot p_i + Y_{i3} \cdot P_3, \quad i = 1, 2, \dots, m. \end{aligned} \quad (4.65)$$

U slučaju C, korišćenjem (4.35) predložena norma je:

$$\sum_{i=1}^m \frac{p_i \cdot o_i - YP_i \cdot f}{YP_i \cdot f} \cdot \log \frac{p_i \cdot o_i}{YP_i \cdot f} \quad (4.66)$$

gde je  $i$ -ta vrsta matrice:

$$YP = \begin{bmatrix} Y_{11} \cdot P_1 & Y_{12} \cdot P_2 & Y_{13} \cdot P_3 \\ Y_{21} \cdot P_1 & Y_{22} \cdot P_2 & Y_{23} \cdot P_3 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ Y_{m1} \cdot P_1 & Y_{m2} \cdot P_2 & Y_{m3} \cdot P_3 \end{bmatrix} \quad (4.67)$$

označena sa  $YP_i, 1 \leq i \leq m$ .

#### **4.1.2.2 Primeri primene matrica usitnjavanja za kontrolu raspodele veličine čestica i hemijskog sastava (sadržaj pepela) frakcija mliva tokom usitnjavanja na prolazištu prvog krupljenja**

Predloženi metod testiran je na primerima usitnjavanja pšenice na prvom prolazištu krupljenja. Kao što je ranije naglašeno, usitnjavanje pšenice predstavlja možda i najočigledniji primer usitnjavanja u kom je sastav dobijenih frakcija mliva jednako bitan kao i veličina čestica, odnosno usitnjavanje ima naglašeno selektivni karakter. Ovde se naročito misli na sadržaj pepela u brašnu, međuproizvodima i sporednim proizvodima mlevenja, koji je široko korišćen kao osnovni kvalitativni pokazatelj efektivnosti tehnološkog postupka mlevenja pšenice. Pepeo je koncentrisan u spoljašnjim delovima zrna i stoga je njegovo prisustvo ili

odsustvo u brašnu relativno precizan pokazatelj separacije endosperma od ostalih anatomskih delova pšeničnog zrna.

Mlivo dobijeno usitnjavanjem pšeničnog zrna na prvom prolazištu krupljenja razvrstano je na osam frakcija analizom sejanja. Polazni uzorak pšenice prethodno je razvrstan u tri frakcije zrna različite krupnoće. Podaci dobijeni analizom sejanja nakon usitnjavanja prikazani su u formi matrice usitnjavanja  $B$ . Kolone matrice usitnjavanja  $B$  predstavljaju masenu distribuciju veličine čestica mliva. U dobijenim frakcijama izlaza (mliva) određen je sadržaj pepela i koristeći te rezultate i rezultate analize sejanja formirana je matrica usitnjavanja  $Y$ , prema proceduri opisanoj u teorijskom delu. Sadržaj pepela u frakcijama zrna prikazan je u formi matrice  $P$ :

$$B = \begin{bmatrix} 0,3136 & 0,3416 & 0,3698 \\ 0,2835 & 0,2897 & 0,2935 \\ 0,1146 & 0,1015 & 0,0859 \\ 0,1310 & 0,1199 & 0,1077 \\ 0,0406 & 0,0356 & 0,0358 \\ 0,0395 & 0,0377 & 0,0364 \\ 0,0394 & 0,0369 & 0,0363 \\ 0,0378 & 0,0371 & 0,0346 \end{bmatrix}, \quad Y = \begin{bmatrix} 0,4422 & 0,4605 & 0,4691 \\ 0,3735 & 0,3729 & 0,3560 \\ 0,0720 & 0,0612 & 0,0585 \\ 0,0520 & 0,0455 & 0,0473 \\ 0,0153 & 0,0137 & 0,0175 \\ 0,0157 & 0,0166 & 0,0185 \\ 0,0130 & 0,0137 & 0,0162 \\ 0,0163 & 0,0159 & 0,0169 \end{bmatrix}, \quad (4.68)$$

$$P = \begin{bmatrix} 1,4 \\ 1,47 \\ 1,58 \end{bmatrix}.$$

U prvom primeru prikazana je procedura za slučaj A, kada je broj izlaznih frakcija veći od broja ulaznih frakcija zrna, a koji je opisan u teorijskom delu. Preciznije, prikazana je procedura za određivanje raspodele veličine zrna pšenice, čijim usitnjavanjem će se dobiti željene vrednosti raspodele veličine čestica mliva, kao i sadržaja pepela u njima.

### **Primer 1**

Na osnovu relacije (4.34), ulazne frakcije zrna  $f_1$  i  $f_2$  mogu se prikazati u linearnoj formi, preko frakcija izlaza (mliva), na sledeći način:

$$f_1 = a_1 \cdot o_1 + a_2 \cdot o_2 + a_3, \quad (4.69)$$

$$f_2 = b_1 \cdot o_1 + b_2 \cdot o_2 + b_3,$$

gde su koeficijenti, izraženi preko elemenata matrice usitnjavanja:

$$a_1 = \frac{b_{22} - b_{23}}{(b_{22} - b_{23}) \cdot (b_{11} - b_{13}) + (b_{21} - b_{23}) \cdot (b_{13} - b_{12})}, \quad (4.70)$$

$$a_2 = \frac{b_{13} - b_{12}}{(b_{22} - b_{23}) \cdot (b_{11} - b_{13}) + (b_{21} - b_{23}) \cdot (b_{13} - b_{12})},$$

$$a_3 = \frac{b_{23} \cdot b_{12} - b_{13} \cdot b_{22}}{(b_{22} - b_{23}) \cdot (b_{11} - b_{13}) + (b_{21} - b_{23}) \cdot (b_{13} - b_{12})},$$

$$b_1 = \frac{b_{21} - b_{23}}{(b_{21} - b_{23}) \cdot (b_{12} - b_{13}) + (b_{22} - b_{23}) \cdot (b_{13} - b_{11})},$$

$$b_2 = \frac{b_{13} - b_{11}}{(b_{21} - b_{23}) \cdot (b_{12} - b_{13}) + (b_{22} - b_{23}) \cdot (b_{13} - b_{11})},$$

$$b_3 = \frac{b_{23} \cdot b_{11} - b_{13} \cdot b_{21}}{(b_{21} - b_{23}) \cdot (b_{12} - b_{13}) + (b_{22} - b_{23}) \cdot (b_{13} - b_{11})},$$

odnosno:

$$a_1 = 55,5231, \quad a_2 = -412,0397, \quad a_3 = 100,4012,$$

$$b_1 = -146,1134, \quad b_2 = 821,1572, \quad b_3 = -186,9769.$$

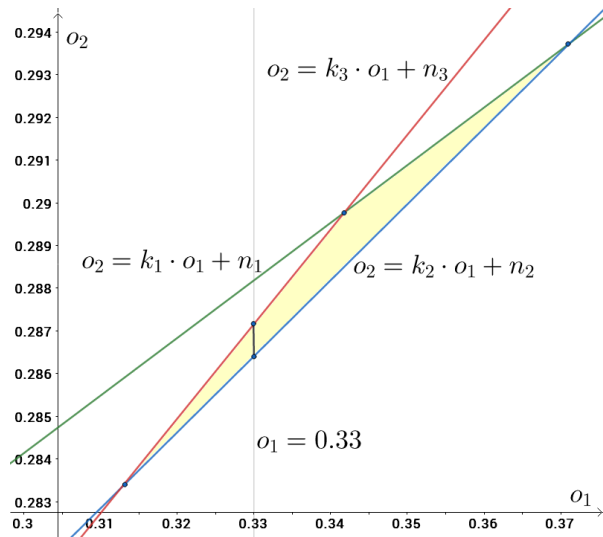
Implementacijom uslova za frakcije ulaza koje predstavljaju masene udele (frakcije zrna različite krupnoće),  $f_1 > 0$ ,  $f_2 > 0$ ,  $f_1 + f_2 < 1$ , problem postaje problem linearnog programiranja, ograničen pravama:

$$o_2 = k_1 \cdot o_1 + n_1, k_1 = \frac{-a_1}{a_2} = 0,1348, n_1 = \frac{-a_3}{a_2} = 0,2437 \quad (4.71)$$

$$o_2 = k_2 \cdot o_1 + n_2, k_2 = \frac{-b_1}{b_2} = 0,1779, n_2 = \frac{-b_3}{b_2} = 0,2277 \quad (4.72)$$

$$o_2 = k_3 \cdot o_1 + n_3, k_3 = \frac{-a_1 - b_1}{a_2 + b_2} = 0,2214, n_3 = \frac{1 - a_3 - b_3}{a_2 + b_2} = 0,2141, \quad (4.73)$$

gde se koeficijenti mogu izračunati na osnovu vrednosti datih u (4.68). Geometrijski posmatrano, navedene prave (4.71-4.73) formiraju trougao (Slika 4.7) čija unutrašnjost predstavlja oblast dopustivih rešenja za masene udele izlaznih frakcija  $o_1$  i  $o_2$ . Tako, prihvatljiva rešenja su one željene vrednosti za izlaze koje je moguće ostvariti pri uslovima postavljenim za raspodelu veličina zrna na ulazu.



Slika 4.7. Oblast dopustivih rešenja za frakcije izlaza (Primer 1)

Na osnovu navedenog sledi da se vrednost masenih udela za frakciju izlaza  $o_1$  može odabrati iz intervala  $(b_{11}, b_{13}) = (0,3136, 0,3698)$ . Odabrana vrednost vodi definisanju prihvatljivih vrednosti masenih udela za izlaz  $o_2$  u preseku prave  $x = o_1$  sa unutrašnjim delom prikazanog trougla. Na primer, ukoliko je  $o_1 = 0,33$ , tada će  $o_2 \in (0,2864, 0,2871)$  (Slika 4.7). Odabirom vrednosti  $o_2 = 0,2868$ , na osnovu relacija iz (4.69) dobijaju se vrednosti za raspodelu veličine zrna na ulazu, kao i za preostale frakcije mliva i sadržaj pepela u njima:

$$f = \begin{bmatrix} 0,5508 \\ 0,3136 \\ 0,1356 \end{bmatrix}, o = B \cdot f = \begin{bmatrix} 0,3300 \\ 0,2868 \\ 0,1066 \\ 0,1244 \\ 0,0384 \\ 0,0385 \\ 0,0382 \\ 0,0371 \end{bmatrix}, p = \begin{bmatrix} 1,9525 \\ 1,8704 \\ 0,8462 \\ 0,6065 \\ 0,6894 \\ 0,6705 \\ 0,5555 \\ 0,7123 \end{bmatrix}. \quad (4.74)$$

Drugi pristup je da se zadaju vrednosti masenih udela svih frakcija na izlazu, u saglasju sa uslovom (4.38). Na primer:

$$o = \begin{bmatrix} 0,3412 \\ 0,2875 \\ 0,1014 \\ 0,1203 \\ 0,0378 \\ 0,0381 \\ 0,0369 \\ 0,0368 \end{bmatrix}, \quad (4.75)$$

čime pronalaženje rešenja postaje problem iz oblasti pozitivnog povratnog slučaja. Korišćenjem semilog norme (4.63) moguće je odrediti raspodelu veličina zrna, koja će voditi

do približnog rešenja za raspodelu veličina čestica mliva  $\tilde{o}$ . Koeficijent determinacije  $r^2$  i vrednosti za sadržaj pepela u izlaznim frakcijama  $p$  tada su:

$$f = \begin{bmatrix} 0,3643 \\ 0,3267 \\ 0,3090 \end{bmatrix}, \tilde{o} = \begin{bmatrix} 0,3401 \\ 0,2886 \\ 0,1015 \\ 0,1202 \\ 0,0375 \\ 0,0380 \\ 0,0376 \\ 0,0366 \end{bmatrix}, p = \begin{bmatrix} 1,9868 \\ 1,8828 \\ 0,9327 \\ 0,5946 \\ 0,6114 \\ 0,6582 \\ 0,5617 \\ 0,6612 \end{bmatrix}, \quad (4.76)$$

$$r^2 = \frac{\sum_{i=1}^m (o_i - \bar{o})^2}{\sum_{i=1}^m (o_i - \bar{o})^2 + \sum_{i=1}^m (o_i - \tilde{o}_i)^2} = 0,99997.$$

### Primer 2.

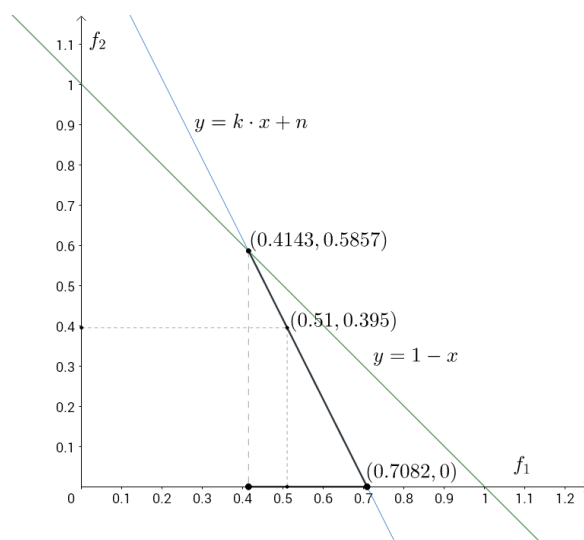
U primerima obrađenim u okviru prve A faze istraživanja, kao i u prethodnom primeru diskutovano je o povratnim matricama usitnjavanja i njihovoj primeni u određivanju raspodele veličine čestica zrna čijim će se usitnjavanjem dobiti željena raspodela veličina čestica mliva. Prethodnim primerom proširuje se pristup i pružaju se informacije i o sastavu frakcija dobijenog mliva. Međutim, u navedenom primeru hemijski sastav frakcija mliva je samo posledica usitnjavanja ulaza sa određenom raspodelom veličine zrna, pri datim uslovima. U primerima koji slede, proširiće se pristup matričnih jednačina. Konkretno, u tekućem primeru testiraće se mogućnosti istovremene kontrole raspodele veličine čestica frakcija zrna i mliva, dok će se u trećem primeru objediniti kontrola raspodele veličina zrna na ulazu, zajedno sa raspodelom veličine čestica i hemijskog sastava frakcija mliva.

Na osnovu uslova (4.38) i matrice usitnjavanja  $B$ , dolazi se do intervala iz kojeg se bira frakcija prvog izlaza  $o_1 \in (0,3136, 0,3698)$ . Ukoliko uzmemo, na primer, da je maseni udeo najkrupnije frakcije mliva  $o_1 = 0,33$ , iz (4.54) se dobija linearna veza između ulaznih frakcija zrna:

$$f_2 = k \cdot f_1 + n, \quad k = -1,9929, n = 1,4113. \quad (4.77)$$

Presek navedene prave sa x-osom i pravom  $f_2 = 1 - f_1$  određuje interval za odabir prihvatljivih vrednosti za maseni udeo prve frakcije zrna  $f_1$  koji je  $f_1 \in (0,4143, 0,7082)$  (Slika 4.8).





**Slika 4.8.** Grafički prikaz rešenja (Primer 2)

Ukoliko se uzme da je, na primer,  $f_1 = 0,51$ , dobijaju se vrednosti za raspodelu veličina zrna i mliva, kao i za sadržaj pepela u frakcijama mliva:

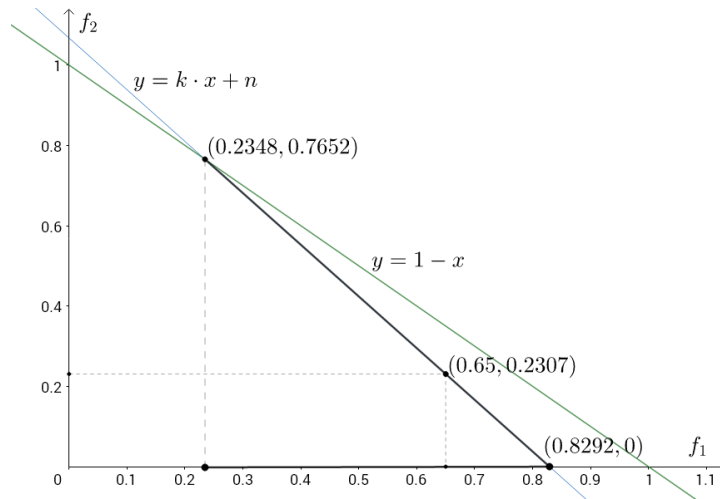
$$f = \begin{bmatrix} 0,5100 \\ 0,3950 \\ 0,0950 \end{bmatrix}, o = \begin{bmatrix} 0,3300 \\ 0,2869 \\ 0,1067 \\ 0,1244 \\ 0,0382 \\ 0,0385 \\ 0,0381 \\ 0,0372 \end{bmatrix}, p = \begin{bmatrix} 1,9535 \\ 1,8724 \\ 0,8512 \\ 0,5914 \\ 0,6442 \\ 0,7160 \\ 0,5707 \\ 0,6607 \end{bmatrix}. \quad (4.78)$$

### Primer 3

Umesto da se biraju maseni udeli frakcija mliva, kao što je urađeno u Primeru 2, moguće je odabrati i sadržaj pepela u nekoj od frakcija mliva i kontrolisati ga zajedno sa masenim udelom jedne frakcije zrna. Sa obzirom da je sadržaj pepela u frakcijama zrna definisan sa  $P$  (zadat u (4.68)) i uzimajući u obzir uslov (4.42), oblast prihvatljivih rešenja za sadržaj pepela u frakciji mliva je:

$$1,9741 \leq p_1 \leq 2,0043. \quad (4.79)$$

Ukoliko odaberemo da je  $p_1 = 1,98$ , na osnovu postupka opisanog u teorijskom delu vezanog za matrice usitnjavanja za kontrolu raspodele veličine čestica i hemijskog sastava (sadržaj pepela) frakcija mliva tokom usitnjavanja na prolazištu prvog krupljenja (Poglavlje 4.1.2.1, relacija 4.43) interval za maseni udeo frakcije zrna  $f_1$  određen je presekom prave  $f_2 = 1 - f_1$  i  $f_2 = k \cdot f_1 + n$ , gde je  $k = -1,2873$ , a  $n = 1,0674$ . Prihvatljiva rešenja za  $f_1$  biraju se iz opsega od 0,2348 do 0,8292 (Slika 4.9).



Slika 4.9. Grafički prikaz rešenja (Primer 3)

Ukoliko se, na primer, uzme da je  $f_1 = 0,65$ , tada su vrednosti raspodele veličine zrna i mliva, kao i sadržaj pepela u frakcijama mliva:

$$f = \begin{bmatrix} 0,6500 \\ 0,2307 \\ 0,1193 \end{bmatrix}, o = \begin{bmatrix} 0,3268 \\ 0,2861 \\ 0,1082 \\ 0,1257 \\ 0,0389 \\ 0,0387 \\ 0,0385 \\ 0,0373 \end{bmatrix}, p = \begin{bmatrix} 1,9800 \\ 1,8644 \\ 0,8997 \\ 0,5703 \\ 0,5625 \\ 0,6045 \\ 0,5079 \\ 0,6284 \end{bmatrix}. \quad (4.80)$$

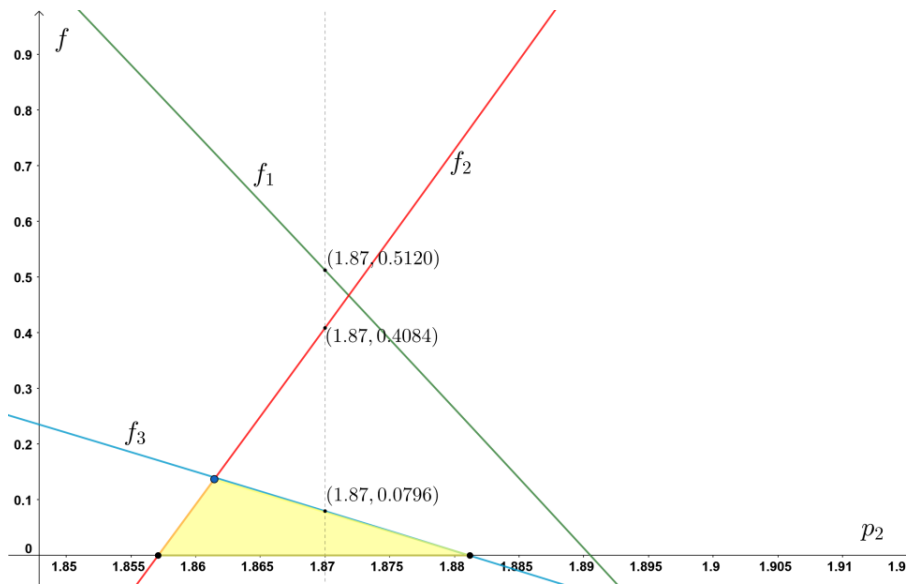
#### Primer 4

U ovom primeru pokazaće se procedura za određivanje raspodele veličina čestica zrna, usitnjavanjem kojih će se dobiti željeni sadržaj pepela u frakcijama mliva. Izračunavanjem koeficijenata iz (4.47) na osnovu konkretnih vrednosti za  $B$ ,  $Y$  i  $P$  datih u (4.68) i uvrštavanjem u (4.46) dobijaju se nelinearne zavisnosti za vrednosti masenih udela frakcija zrna pšenice,  $f_1$ ,  $f_2$  i  $f_3$ :

$$\begin{aligned} f_1(p_1, p_2) &= \frac{-0,00687146 \cdot p_1 p_2 + 0,0106 \cdot p_1 + 0,016 \cdot p_2 - 0,0255}{-0,00006844 \cdot p_1 p_2 + 0,00031154 \cdot p_1 + 0,00017846 \cdot p_2 - 0,00079466}, \\ f_2(p_1, p_2) &= \frac{0,0128 \cdot p_1 p_2 - 0,017 \cdot p_1 - 0,0284 \cdot p_2 + 0,0393}{-0,00006844 \cdot p_1 p_2 + 0,00031154 \cdot p_1 + 0,00017846 \cdot p_2 - 0,00079466}, \\ f_3(p_1, p_2) &= \frac{-0,005999368 \cdot p_1 p_2 + 0,00671872 \cdot p_1 + 0,0125636 \cdot p_2 - 0,01461256}{-0,00006844 \cdot p_1 p_2 + 0,00031154 \cdot p_1 + 0,00017846 \cdot p_2 - 0,00079466}. \end{aligned} \quad (4.81)$$

Tako se sistem (4.48), sastoji iz tri nelinearne nejednačine konkretizovane u (4.81). Dalje, ukoliko se odaberu vrednosti za sadržaj pepela u dve frakcije mliva istovremeno, rešenje je predstavljeno unutrašnjošću trodimenzionalnog tela, te stoga nije jednostavno definisati prihvatljiva rešenja. Sa druge strane, korišćenjem relacije (4.42), moguće je proizvoljno odabrati sadržaj pepela u prvoj frakciji mliva. Na primer, uzmimo da je  $p_1 = 1,98$ . Tada će

se, na osnovu (4.81) dobiti dvodimenzionalna oblast za odabir prihvatljivih rešenja za  $p_2$  (Slika 4.10).



**Slika 4.10.** Grafički prikaz prihvatljivih rešenja za  $p_2$  (Primer 4)

Preseci dobijenih prava sa  $p_2$ -osom određuju oblast u kojoj su vrednosti za  $f_1, f_2, f_3$  pozitivne, što dalje implicira da je prihvatljiv opseg za odabir vrednosti  $p_2 \in (1,8571, 1,8812)$ . Ukoliko se uzme da je  $p_2 = 1,87$ , tada će vrednosti raspodele veličine zrna i mliva, kao i sadržaj pepela u frakcijama mliva biti:

$$f = \begin{bmatrix} 0,5120 \\ 0,4084 \\ 0,0796 \end{bmatrix}, o = \begin{bmatrix} 0,3295 \\ 0,2868 \\ 0,1070 \\ 0,1246 \\ 0,0382 \\ 0,0385 \\ 0,0381 \\ 0,0373 \end{bmatrix}, p = \begin{bmatrix} 1,9800 \\ 1,8700 \\ 0,8948 \\ 0,5661 \\ 0,5604 \\ 0,6113 \\ 0,5135 \\ 0,6268 \end{bmatrix}. \quad (4.82)$$

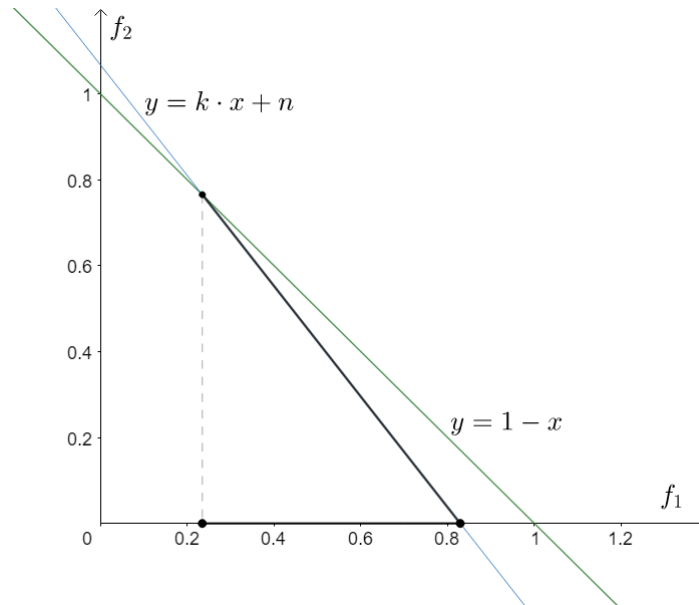
Alternativnim pristupom moguće je odabrati vrednost sadržaja pepela prve frakcije mliva  $p_1$  na osnovu (4.42) i tada je sa (4.41) definisana linearna veza između masenih udela frakcija zrna  $f_1$  i  $f_2$ . Ukoliko se ponovo uzme da je  $p_1 = 1,98$ , prihvatljive vrednosti za maseni udeo frakcije zrna  $f_1$  kretaće se u opsegu od 0,2348 do 0,8292, a grafički su dobijeni kao preseci prava  $f_2 = 1 - f_1$  i  $f_2 = k \cdot f_1 + n$ , gde je  $k = -1,2873$  i  $n = 1,0674$  (Slika 4.11).

Na osnovu (4.46) dobija se monotono opadajuća nelinearna funkcija:

$$p_2(f_1) = \frac{-0,0212 \cdot f_1 + 0,5472}{-0,005108 \cdot f_1 + 0,2894} \quad (4.83)$$

i granice intervala za odabir masenog udela frakcije  $f_1$  određuje opseg prihvatljivih rešenja za sadržaj pepela u drugoj frakciji izlaza  $p_2 \in (p_2(0,8292), p_2(0,2348)) = (1,8571, 1,8812)$ .

Ukoliko se, kao i u prvom delu ovog primera, ponovo odabere da je  $p_2 = 1,87$ , dobiće se identična rešenja za  $f$ ,  $o$  i  $p$ .



**Slika 4.11.** Grafički prikaz prihvatljivih vrednosti za  $f_1$  (Primer 4)

Ukoliko se zadaju vrednosti za sadržaj pepela u svim frakcijama mliva, na primer:

$$p = \begin{bmatrix} 1,9678 \\ 1,8621 \\ 0,8302 \\ 0,6329 \\ 0,8346 \\ 0,7294 \\ 0,6357 \\ 0,8608 \end{bmatrix}, \quad (4.84)$$

upotrebom semilog norme (4.63) dobijaju se približna rešenja za  $\tilde{p}$ , sa koeficijentom determinacije  $r^2$ :

$$f = \begin{bmatrix} 0,4015 \\ 0,2506 \\ 0,3479 \end{bmatrix}, \tilde{p} = \begin{bmatrix} 1,9675 \\ 1,8611 \\ 0,8250 \\ 0,6299 \\ 0,8233 \\ 0,7286 \\ 0,6330 \\ 0,8492 \end{bmatrix}, \quad (4.85)$$

$$r^2 = \frac{\sum_{i=1}^m (p_i - \bar{p})^2}{\sum_{i=1}^m (p_i - \bar{p})^2 + \sum_{i=1}^m (p_i - \tilde{p}_i)^2} = 0,99985.$$

Kao posledica dobijenog ulaznog vektora  $f$ , raspodela veličina čestica mliva je takođe određena:

$$o = \begin{bmatrix} 0,3402 \\ 0,2885 \\ 0,1013 \\ 0,1201 \\ 0,0377 \\ 0,0380 \\ 0,0377 \\ 0,0365 \end{bmatrix}. \quad (4.86)$$

### Primer 5

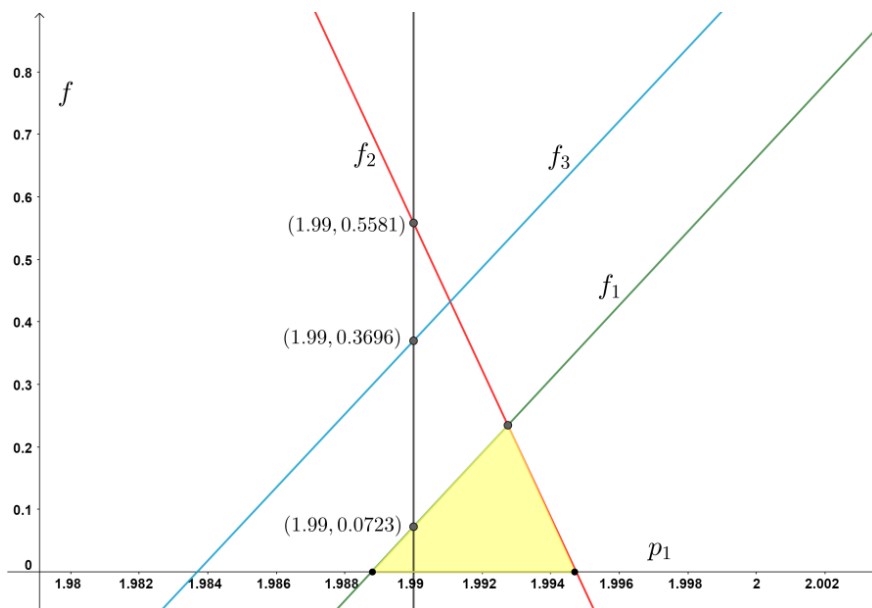
Poslednji primer u ovoj celini ilustrovaće upotrebu matrica za istovremenu kontrolu raspodele veličine čestica mliva i sadržaja pepela u njima. Razmotreni su i precizan i približan pristup, kao i različiti načini izvedbe prilikom korišćenja preciznog pristupa. Sa obzirom da se u preciznom pristupu proizvoljno može odabrati  $n-1$  frakcija mliva, pokazano je kako vrednost za sadržaj pepela u jednoj frakciji mliva zajedno sa masenim udelom te frakcije u izlaznom materijalu determiniše rešenje, odnosno raspodelu veličine zrna i hemijski sastav frakcija mliva koji se javljaju kao posledica raspodele veličine zrna na ulazu. Na osnovu vrednosti iz (4.68) i koeficijenata iz (4.52) dobijaju se sledeće relacije:

$$\begin{aligned} f_1(o_1, p_1) &= 168,5665 \cdot o_1 \cdot p_1 - 384,0149 \cdot o_1 + 17,0709, \\ f_2(o_1, p_1) &= -335,9375 \cdot o_1 \cdot p_1 + 729,8452 \cdot o_1 - 20,9073, \\ f_3(o_1, p_1) &= 167,371 \cdot o_1 \cdot p_1 - 345,8304 \cdot o_1 + 4,8364. \end{aligned} \quad (4.87)$$

Prihvatljiva rešenja za  $o_1$  i  $p_1$  mogu se prikazati trodimenzionalno, kao rešenja sistema tri nelinearne nejednačine koje predstavljaju uslov za pozitivnost ulaznih frakcija zrna. Sa druge strane, u skladu sa uslovom (4.38) vrednost jednog masenog udela neke od izlazne frakcije može se odabrati proizvoljno, na primer  $o_1 = 0,35$  i na osnovu (4.87) dobiti dvodimenzionalnu oblast, koja je prikazana Slikom 4.12.

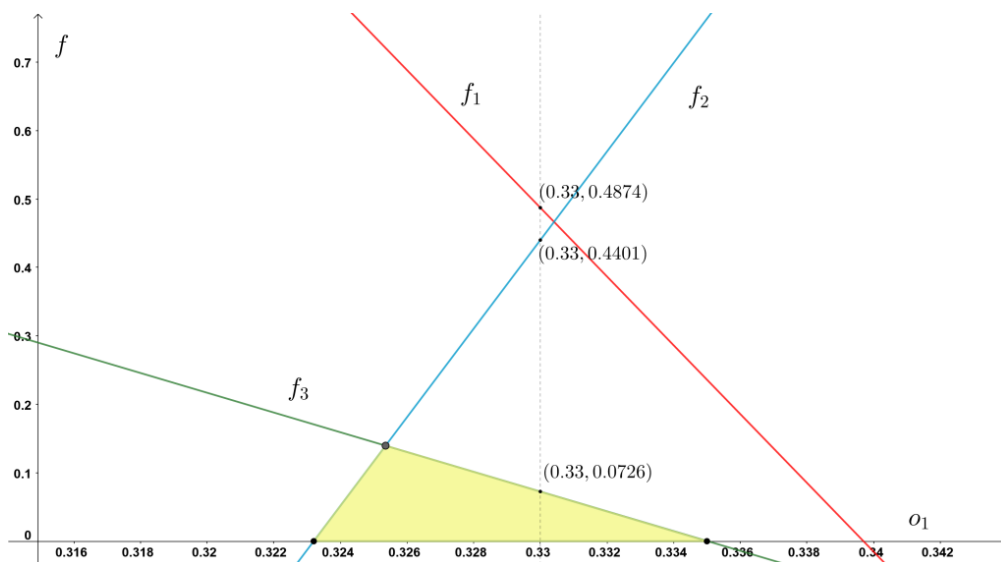
Kako ulazne frakcije, odnosno maseni udeli frakcija zrna različite krupnoće moraju da imaju pozitivne vrednosti, prihvatljive vrednosti za  $p_1$  nalaze se u opsegu od 1,9888 do 1,9947. Odabirom vrednosti za  $p_1$ , na primer  $p_1 = 1,99$  dobijaju se sledeća rešenja:

$$f = \begin{bmatrix} 0,0723 \\ 0,5581 \\ 0,3696 \end{bmatrix}, o = \begin{bmatrix} 0,35 \\ 0,2907 \\ 0,0967 \\ 0,1162 \\ 0,0360 \\ 0,0373 \\ 0,0369 \\ 0,0362 \end{bmatrix}, p = \begin{bmatrix} 1,99 \\ 1,8979 \\ 0,9489 \\ 0,6043 \\ 0,6385 \\ 0,6964 \\ 0,5973 \\ 0,6864 \end{bmatrix}. \quad (4.88)$$



**Slika 4.12.** Grafički prikaz rešenja (Primer 5)

Takođe, na osnovu (4.42) vrednost za  $p_1$  mogu se prvobitno odabrati iz intervala  $(1,9196, 2,0081)$ . Ukoliko uzmemo da je na primer  $p_1 = 1,99$ , tada će, na osnovu (4.87) oblast prihvatljivih rešenja za izlaznu frakciju  $o_1$  biti od 0,3232 do 0,3350, što je prikazano Slikom 4.13.



**Slika 4.13.** Grafički prikaz prihvatljivog opsega za odabir vrednosti za  $o_1$  (Primer 5)

Odabirom, na primer,  $o_1 = 0,33$  dobija se sledeće rešenje:

$$f = \begin{bmatrix} 0,4874 \\ 0,4401 \\ 0,0726 \end{bmatrix}, o = \begin{bmatrix} 0,33 \\ 0,2870 \\ 0,1068 \\ 0,1244 \\ 0,0381 \\ 0,0385 \\ 0,0381 \\ 0,0373 \end{bmatrix}, p = \begin{bmatrix} 1,9800 \\ 1,8710 \\ 0,8990 \\ 0,5653 \\ 0,56 \\ 0,6125 \\ 0,5145 \\ 0,6815 \end{bmatrix}. \quad (4.89)$$

Ako posmatramo približan pristup, zadavanjem vrednosti masenih udela i sadržaja pepela u svim frakcijama mliva, na primer:

$$o = \begin{bmatrix} 0,3412 \\ 0,2875 \\ 0,1014 \\ 0,1203 \\ 0,0378 \\ 0,0381 \\ 0,0369 \\ 0,0368 \end{bmatrix}, p = \begin{bmatrix} 1,9678 \\ 1,8621 \\ 0,8302 \\ 0,6329 \\ 0,8346 \\ 0,7294 \\ 0,6357 \\ 0,8608 \end{bmatrix}, \quad (4.90)$$

i upotrebom semilog norme (4.63) dobija se raspodela veličine čestica zrna, koja će dovesti do približnih rešenja  $\tilde{o}$  i  $\tilde{p}$ , sa koeficijentom determinacije  $r^2$ :

$$f = \begin{bmatrix} 0,4103 \\ 0,2437 \\ 0,3460 \end{bmatrix}, \tilde{o} = \begin{bmatrix} 0,3399 \\ 0,2885 \\ 0,1015 \\ 0,1202 \\ 0,0377 \\ 0,0380 \\ 0,0377 \\ 0,0365 \end{bmatrix}, \tilde{p} = \begin{bmatrix} 1,9676 \\ 1,8605 \\ 0,8235 \\ 0,6332 \\ 0,8343 \\ 0,7219 \\ 0,6321 \\ 0,8617 \end{bmatrix} \quad (4.91)$$

$$r^2 = \frac{\sum_{i=1}^m (o_i - \tilde{o})^2 + \sum_{i=1}^m (p_i - \tilde{p})^2}{\sum_{i=1}^m (o_i - \tilde{o})^2 + \sum_{i=1}^m (o_i - \tilde{o}_i)^2 + \sum_{i=1}^m (p_i - \tilde{p})^2 + \sum_{i=1}^m (p_i - \tilde{p}_i)^2} = 0,99994.$$

## 4.2 DRUGA FAZA

U okviru druge faze, u kojoj je ispitana primena metode odzivne površi u cilju kontrole i optimizacije efekata mlevenja griza, sprovedeno je 27 eksperimenata čiji je redosled dat Box-Behnken eksperimentalnim dizajnom. Četiri ispitivana parametra bili su: A – razmak između valjaka [mm], B – broj obrtaja valjaka [o/min], C – prenosni odnos i D – specifično opterećenje valjaka [kg/cm·min]. Kao odzivni parametri posmatrani su: R1 – prinos brašna (%), R2 – sadržaj pepela u brašnu (%)<sub>sm</sub>, R3 – potrošnja energije u odnosu na masu samlevenog materijala [kJ/kg] i R4 – potrošnja energije u odnosu na masu dobijenog brašna [kJ/kg]. U Tabeli 4.3 prikazane su kombinacije preporučenih parametara usitnjavanja u slučajno odabranom redosledu, i dobijene vrednosti za odzive.

**Tabela 4.3.** Box-Behnken eksperimentalni dizajn i dobijene vrednosti odziva

Broj eksperimenta	A	B	C	D	R1	R2	R3	R4
1	0,1	500	1,5	0,3	10,26	0,43	35,87	349,74
2	0,07	400	1,5	0,3	14,49	0,41	33,64	232,21
3	0,07	500	1,5	0,2	21,33	0,39	55,6	260,65
4	0,07	400	1,1	0,2	10,48	0,36	36,85	351,62
5	0,07	500	1,5	0,4	13,66	0,37	34,74	254,32
6	0,04	500	1,5	0,3	17,85	0,39	42,98	240,81
7	0,07	400	1,9	0,4	11,8	0,42	37,77	320,21
8	0,07	400	1,5	0,3	14,19	0,39	34,44	242,73
9	0,04	400	1,5	0,4	12,05	0,41	33,45	277,73
10	0,07	300	1,9	0,3	11,01	0,42	36,84	334,78
11	0,07	400	1,9	0,2	16,83	0,42	53,07	315,21
12	0,04	400	1,5	0,2	21,76	0,39	53,63	246,46
13	0,07	500	1,1	0,3	10,52	0,38	31,75	301,77
14	0,1	400	1,9	0,3	9,3	0,43	36,02	387,34
15	0,1	400	1,1	0,3	6,23	0,42	22,85	367,04
16	0,07	400	1,5	0,3	12,94	0,41	33,76	260,86
17	0,04	400	1,1	0,3	10,19	0,41	26,26	257,67
18	0,07	300	1,5	0,4	10,06	0,37	24,96	248,2
19	0,07	400	1,1	0,4	6,45	0,4	19,69	305,51
20	0,04	400	1,9	0,3	14,07	0,42	45,15	320,9
21	0,1	400	1,5	0,4	9,61	0,39	26,35	274,36
22	0,1	400	1,5	0,2	10,26	0,43	40,6	395,9
23	0,04	300	1,5	0,3	12,91	0,4	31,38	243,08
24	0,07	300	1,5	0,2	14,63	0,39	38,31	261,93
25	0,07	300	1,1	0,3	5,56	0,45	22,08	397,43
26	0,07	500	1,9	0,3	15,38	0,41	49,28	320,38
27	0,1	300	1,5	0,3	9,17	0,42	25,09	273,72



Za svaki odziv je na osnovu podataka dobijenih ANOVA analizom određen je uticaj parametara na posmatrani odziv. Na osnovu  $p$  vrednosti ( $p < 0,05$ ), određeni su ulazni faktori, interakcije ulaznih faktora ili kvadratni članovi ulaznih faktora koji su statistički značajno uticali na posmatrane odzive. Na osnovu vrednosti nedostatka fitovanja (lack of fit) koja se nije pokazala kao statistički značaja ( $p > 0,05$ ), potvrđeno je poklapanje eksperimentalnih podataka sa podacima dobijenim na osnovu polinomnog modela drugog reda. Adekvatnost predloženog modela procenjena je koeficijentom determinacije  $R^2$ . Na kraju, dati su primeri optimizacije postupka mlevenja griza, spram unapred postavljenih (željenih) efekata usitnjavanja (vrednosti odzivnih parametara), a na osnovu modela dobijenog primenom metode odzivne površine.

#### 4.2.1 Uticaj parametara usitnjavanja na prinos brašna

Prinos brašna (R1) varirao je od 5,56% (eksperiment 25) do 21,76% (eksperiment 12) (Tabela 4.3). Na osnovu  $p$  vrednosti iz ANOVA tabele (Tabela 4.4) moguće je zaključiti da su linearni članovi svih parametara kao i kvadratni članovi razmaka između valjaka, prenosnog odnosa i specifičnog opterećenja valjaka ispoljili značajan uticaj na posmatrani odziv.

**Tabela 4.4.** ANOVA tablica za prinos brašna i vrednost koeficijenta determinacije za predloženi model

Član	Suma kvadrata	df**	Srednja kvadratna greška	F-vrednost	p-vrednost
Model*	407,43	10	40,74	49,93	< 0,0001
A-A : Razmak između valjaka	96,45	1	96,45	118,19	< 0,0001
B-B : Broj obrtaja brzohodnog valjka	54,96	1	54,96	67,35	< 0,0001
C-C : Prenosni odnos	69,94	1	69,94	85,71	< 0,0001
D-D : Specifčno opterećenje valjaka	83,64	1	83,64	102,49	< 0,0001
AB	3,71	1	3,71	4,54	0,0489
AD	20,54	1	20,54	25,18	0,0001
BD	2,4	1	2,4	2,94	0,1055
A <sup>2</sup>	7,37	1	7,37	9,03	0,0084
C <sup>2</sup>	57,19	1	57,19	70,08	< 0,0001
D <sup>2</sup>	3,83	1	3,83	4,69	0,0457
Residual	13,06	16	0,816		
Lack of Fit	11,71	14	0,8365	1,24	0,533
Greška	1,35	2	0,6728		
Ukupno	420,49	26			

\* vrednost koeficijenta determinacije za predloženi model:  $R^2 = 0,9689$

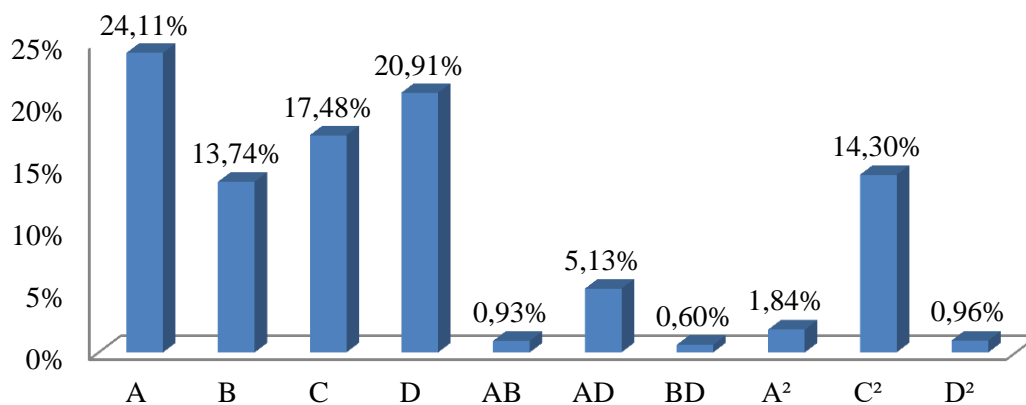
\*\* broj stepeni slobode

Pored toga, na prinos brašna statistički značajan uticaj ima i interakcija razmak između valjaka i broj obrtaja brzohodnog valjka, kao i interakcija razmak između valjaka i specifično opterećenje valjaka. Kvadratni član najznačajniji uticaj ima za ulazni faktor C – prenosni odnos.

Pojedinačni udeli uticaja parametara usitnjavanja na ostvareni prinos brašna određeni srazmerno vrednosti sume kvadrata, tj. srednje kvadratne greške prikazani su Slikom 4.14. Na osnovu visokog koeficijenta determinacije ( $R^2=0,9689$ ; Tabela 4.4), može se zaključiti da predloženi model (4.92) na adekvatan način opisuje posmatrani eksperiment:

$$y = 13,84 - 2,83 A + 2,14 B + 2,41 C - 2,64 D - 0,9625 AB + 2,27 AD - 0,775 BD - 1,11 A^2 - 3,09 C^2 \quad (4.92)$$

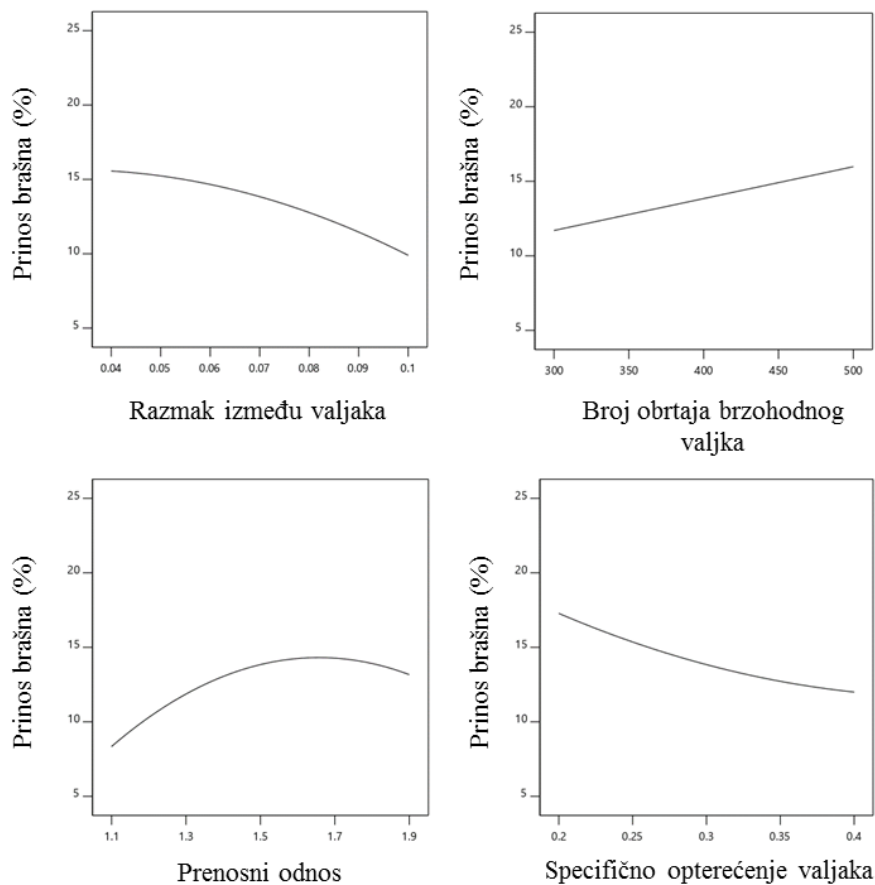
Trend uticaja parametara usitnjavanja na posmatrani izlaz predstavljen ja na Slici 4.15. Za svaki od uticaja prikazanih na slici vrednosti ostalih ulaznih parametara postavljene su na srednju vrednost. Može se primetiti da je smanjenje najuticajnijeg linearnog parametra – razmaka između valjaka – uticalo na povećanje prinosa brašna (Slika 4.15a). Veoma značajan uticaj razmaka između valjaka na prinos brašna može se ilustrovati ukoliko se sagledaju eksperimenti 12 i 22. Tokom ovih eksperimenata, vrednosti svih parametara (broj obrtaja valjaka, prenosni odnos i specifično opterećenje valjaka) bile su konstantne (400 o/min, 1,5 i 0,2 kg/cm·min, respektivno), osim razmaka između valjaka koji je varirao od 0,04 do 0,1 mm (Tabela 4.3).



**Slika 4.14.** Vrednost uticaja parametara usitnjavanja na prinos brašna

Povećanjem razmaka između valjaka sa 0,04 mm na 0,1 mm zapaža se relativno smanjenje prinosa brašna za 52,84%, odnosno prinos brašna se smanjio sa 21,76% na 10,26%. Negativan uticaj povećanja razmaka između valjaka na prinos brašna je očekivan. Sa povećanjem razmaka između valjaka, smanjuje se intenzitet sila deformacije sabijanja u mlevnom prostoru, čime je i naprezanje čestica usitnjavanog materijala (griza) manje, što prouzrokuje manji stepen usitjenosti mliva. Nasuprot tome, pri smanjenju razmaka između valjaka menja se odnos sila sabijanja i smicanja u mlevnom prostoru u korist sila sabijanja,

naprezanje čestica materijala raste i stepen usitnjavanja endosperma, kao tipično drobitivog tela, se povećava [69].



**Slika 4.15.** Trend uticaja parametara usitnjavanja na prinos brašna

Pored toga, povećanjem zazora između valjaka skraćuje se mlevni put, odnosno dužina mlevnog prostora, što skraćuje vreme tokom kojeg je čestica izložena dejstvu sila deformacije što ima negativan uticaj na stepen usitjenosti mliva [4,19]. Ostvareni rezultati i iz toga izvučeni zaključci u skladu su sa prethodnim istraživanjima koja su se bavila ispitivanjem uticaja razmaka između valjaka na prinos brašna [34,78,125,173].

Povećanje broja obrtaja brzohodnog valjka ispoljilo je pozitivan uticaj na prinos brašna (Slika 4.15b). Razlog ovakvom uticaju je činjenica da se pri većim obimnim brzinama valjaka povećava brzina prenosa sila deformacije sa valjaka na čestice usitnjavanog materijala, te se i materijal usitjava u većem stepenu zbog intenzivnijeg delovanja na čestice [72,83]. Scanlon i Dexter [82] i Fišteš i Tanović [86] takođe navode da povećanjem obimnih brzina valjaka čestice usitnjavaju u većem stepenu, čime se povećava prinos brašna. Zapaženi uticaj broja obrtaja brzohodnog valjka na prinos brašna u skladu je i sa teorijom Perry i Chilton-a [79], prema kojoj je akcija usitnjavanja direktno proporcionalna odnosu obimnih brzina i specifičnog opterećenja valjaka. Naime, kada se poveća obimna brzina (broj obrtaja) valjaka

(pri nepromenjenom specifičnom opterećenju) svaka čestica biva intenzivnije izložena akciji usitnjavanja. Na taj način se povećava stepen usitnjenosti, što implicira i veći prinos brašna.

Teorija Perry i Chilton-a [79] takođe predviđa da povećanje specifičnog opterećenja valjaka, pri konstantnoj obimnoj brzini valjaka negativno utiče na stepen usitnjenosti. Autori ovakav trend uticaja objašnjavaju činjenicom da ukoliko veću količinu materijala dovedemo na istu mlevnu dužinu u kraćem vremenskom periodu, pojedinačno posmatrano, svaka čestica biće manje izložena dejstvu sila deformacije u mlevnom prostoru. Takav trend uticaja zapažen je i u okviru ovog istraživanja gde povećanje specifičnog opterećenja valjaka prati smanjenje prinosa brašna, što ukazuje na manji stepen usitnjenosti i manji intenzitet akcije usitnjavanja na čestice griza kao polaznog materijala (Slika 4.15d).

Prenosni odnos je jedini parametar koji je ispoljio dvojak uticaj na prinos brašna. Sa porastom prenosnog odnosa u intervalu od 1,1 do 1,65 prinos brašna je rastao. Međutim, sa daljim porastom prenosnog odnosa prinos brašna je počeo da opada (Slika 4.15c). Ovakav trend uticaja mogao je da se očekuje i na osnovu visokog uticaja kvadratnog člana parametra prenosnog odnosa ( $C^2$ ; Slika 4.14). Prethodna istraživanja koja su ispitivala uticaj promene prenosnog odnosa na ostvareni prinos brašna pri mlevenju griza glatkim valjcima navode isti trend uticaja, ali uz različite vrednosti prelomne tačke, tj. vrednosti pri kojoj dolazi do promene trenda uticaja. Scanlon i Dexter [82] navode vrednost od  $i = 1,4$ , Scanlon i saradnici [174]  $i = 1,5$ , dok Evers i saradnici [89] i Fišteš i Tanović [86] kao prelomnu tačku navode vrednost od  $i = 1,25$ . Promena trenda uticaja potiče od prirode sila deformacije koje se prenose na čestice pri različitim prenosnim odnosima. U slučaju kada je prenosni odnos ima vrednosti bliske jedinici najdominantnije sile u mlevnom prostoru su sile sabijanja. Porastom prenosnog odnosa rastu sile smicanja čime se menja relativan odnos sila sabijanja i smicanja, a time i priroda uticaja sila na čestice u mlevnom prostoru. Za usitnjavanje pšeničnog griza, koji je po svom sastavu većinski sačinjen od čestica endosperma, pogodnije su sile sabijanja u poređenju sa silama smicanja. Naime, pri relativno malim prenosnim odnosima i dominantnim silama deformacije sabijanja, dolazi do efikasnog usitnjavanja endosperma kao drobitog tela, dok se čestice spoljašnjih slojeva zrna kao tipično plastična tela presuju. Stoga se, mereno spram prinosa brašna, pri nižim vrednostima prenosnog odnosa postiže bolja efikasnost usitnjavanja griza.

Od faktora interakcije parametara, najuticajnija je bila interakcija razmak između valjaka i specifično opterećenje valjaka, sa doprinosom od oko 5% (Slika 4.14). Pretpostavlja se da bi uticaj ove interakcije bio još dominantniji u slučaju kada bi eksperimentalni opseg za razmak između valjaka bio proširen u pravcu manjih, a za specifično opterećenje valjaka u pravcu većih vrednosti. Naime, pri visokim specifičnim opterećenjima može doći do razmicanja trupaca usled povećanog pritiska na valjke što povećava razmak između valjaka, a što bi se negativno odrazilo na stepen usitnjenosti mliva, a samim tim i na prinos brašna. Takođe, pri velikim specifičnim opterećenjima i malim razmacima između valjaka može doći do povišenog zagrevanja materijala usled povećane transformacije mehaničke u toplotnu energiju. Ovo može dovesti do promene oblika deformacije, odnosno do pojave plastičnih deformacija što pri dominantnim silama deformacije sabijanja u mlevnom prostoru smanjuje stepen usitnjenosti mliva, a time i prinos brašna [34].

Najviši prinos brašna dobijen je u eksperimentima 12 (21,76%) i 3 (21,33%). U oba navedena slučaja prenosni odnos i specifično opterećenje imali su istu vrednost (1,5 i 0,2 kg/cm·min, respektivno), dok su razmak između valjaka i brzina obrtaja brzohodnog valjka varirani. Kao što se može videti, prinos brašna dostizao je maksimalne vrednosti u slučaju kada je specifično opterećenje bilo minimalno, a prenosni odnos blizu vrednosti prelomne tačke (vrednost prelomne tačke  $i = 1,65$ ). U eksperimentu 12, razmak između valjaka bio je najuži mogući – 0,04 mm, dok je broj obrtaja brzohodnog valjka bio 400 o/min. Sa druge strane, u eksperimentu 3 razmak između valjaka i obimna brzina su povećani na 0,07 mm i na 500 o/min, respektivno. Može se primetiti da ne dolazi do očekivanog pada u prinosu brašna usled povećanja razmaka između valjaka i sledstvenog smanjenja intenziteta sila deformacija sabijanja u mlevnom prostoru. Razlog tome je istovremeno povećanje obimnih brzina valjaka, čime se povećava brzina prenosa sila deformacije na usitnjavani materijal, intenzivira delovanje na čestice i nadomešćuje očekivano smanjenje u prinosu brašna izazvano povećanjem razmaka između valjaka.

#### 4.2.2 Uticaj parametara usitnjavanja na sadržaj pepela u brašnu

Sadržaj pepela u uzorcima dobijenog brašna varirao je od 0,36% u eksperimentu 4 (pri ulaznim parametarima: A: 0,07 mm; B: 400 o/min; C: 1,1 i D: 0,2 kg/cm·min) do 0,45% u eksperimentu 25 (pri ulaznim parametrima: A: 0,07 mm; B: 300 o/min; C: 1,1 i D: 0,3 kg/cm·min), izraženo na suhu materiju (Tabela 4.3). Na osnovu  $p$  vrednosti datih u ANOVA tabeli (Tabela 4.5) može se izvesti zaključak da nijedan faktor nijednog od ispitivanih parametara usitnjavanja nije ispoljio statistički značajan uticaj na posmatrani odziv.

Pored toga, niskim koeficijentom determinacije ( $R^2 = 0,615$ ) sugerisano je da predloženi model (4.93) nije adekvatan.

$$y = 0,4006 + 0,0083A - 0,007B + 0,0069C - 0,0037D + 0,0054AB - 0,0134AD + 0,0165BC + 0,0102A^2 + 0,0107C^2 - 0,0138D^2 \quad (4.93)$$

Neadekvatnost modela i nedostatak ispoljenog statistički značajnog uticaja parametara na odziv izvesno je posledica vrlo niskog sadržaja pepela u samom polaznom uzorku. Kao što je pomenuto polazni uzorak bio je prečišćeni griz uzorkovan sa čistilica griza iz industrijskog mlina, najvećim delom sačinjen od čestica endosperma bez prisustva čestica poreklom iz spoljašnjih delova zrna, a koje u odnosu na endosperm sadrže znatno veće količine mineralnih materija. Stoga je, nezavisno od uslova usitnjavanja i ostvarenog prinosa brašna, sadržaj pepela u brašnu bio približno ujednačen i nizak. Praktično, bilo koja promena parametara usitnjavanja nije mogla da naruši selektivnost usitnjavanja sa obzirom na homogen polazni uzorak – čist griz bez prisustva spoljašnjih slojeva zrna, što za rezultat ima nizak i relativno ujednačen sadržaj pepela u svim eksperimentima. Činjenica da promena parametara usitnjavanja nije dovela do promene sadržaja pepela u brašnu za rezultat ima činjenicu da nijedan parametar nije ispoljio statistički značajan uticaj na ovaj odziv.

**Tabela 4.5.** ANOVA tablica za sadržaj pepela u brašnu i vrednost koeficijenta determinacije za predloženi model

Član	Suma kvadrata	df**	Srednja kvadratna greška	F-vrednost	p-vrednost
Model*	0,0073	10	0,0007	2,56	0,0457
A-A : Razmak između valjaka	0,0008	1	0,0008	2,9	0,1079
B-B : Broj obrtaja brzohodnog valjka	0,0006	1	0,0006	2,05	0,171
C-C : Prenosni odnos	0,0006	1	0,0006	2,02	0,1743
D-D : Specifčno opterećenje valjaka	0,0002	1	0,0002	0,5675	0,4622
AB	0,0001	1	0,0001	0,4144	0,5289
AD	0,0007	1	0,0007	2,53	0,1313
BC	0,0011	1	0,0011	3,83	0,068
A <sup>2</sup>	0,0006	1	0,0006	2,19	0,158
C <sup>2</sup>	0,0007	1	0,0007	2,42	0,1395
D <sup>2</sup>	0,0011	1	0,0011	4	0,0628
Residual	0,0046	16	0,0003		
Lack of Fit	0,0044	14	0,0003	3,34	0,2544
Greška	0,0002	2	0,0001		
Ukupno	0,0119	26			

\* vrednost koeficijenta determinacije za predloženi model:  $R^2 = 0,615$

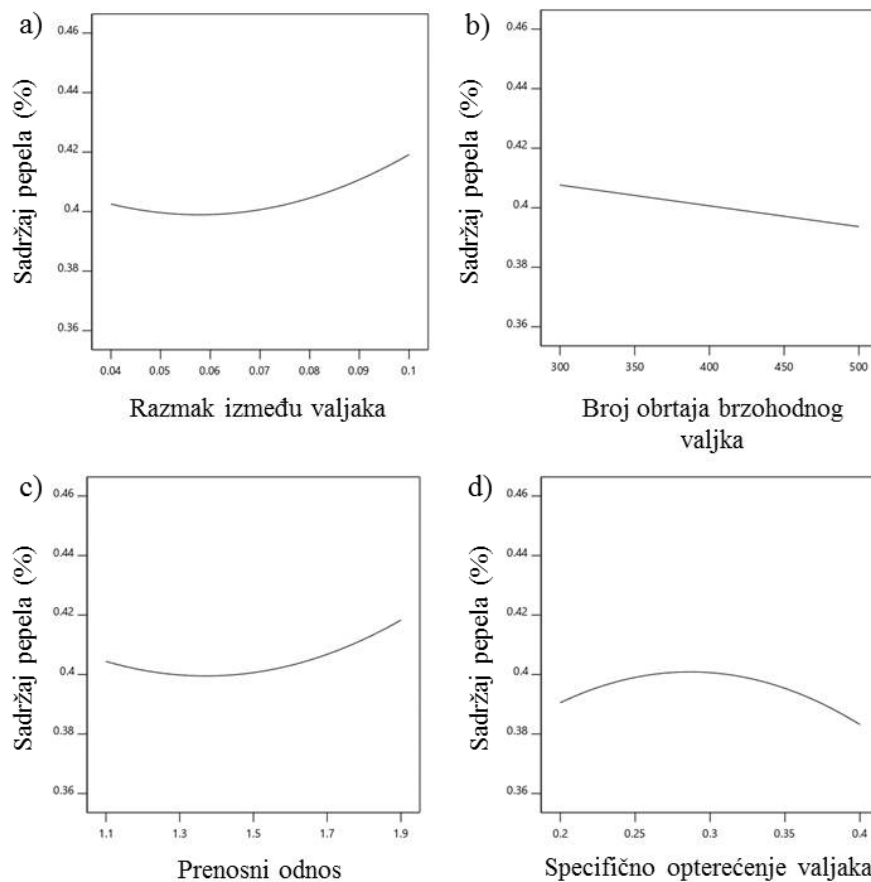
\*\* broj stepeni slobode

Ipak, na osnovu dobijenih rezultata bilo je moguće ispratiti trend uticaja parametara usitnjavanja na sadržaj pepela u dobijenom brašnu (Slika 4.16).

Razmak između valjaka i prenosni odnos ispoljili su sličan trend uticaja na posmatrani odziv (Slika 4.16a; 4.16c). Njihovim povećanjem sadržaj pepela se prvobitno blago smanjivao, nakon čega bi se, daljim povećanjem, sadržaj pepela povećao. Kada je u pitanju uticaj prenosnog odnosa na sadržaj pepela u brašnu pri mlevenju glatkim valjcima do sličnih zapažanja došli su i Scanlon i Dexter [82] i Scanlon i saradnici [174]. Ispitivanja ruskih autora [72,81] takođe navode slične trendove, kao i ispitivanja Fišteša i Tanovića [86] koji navode da je povećanje prenosnog odnosa iznad vrednosti od 1,25 praćeno povećanjem sadržaja pepela u brašnu.

Sa povećanjem specifičnog opterećenja valjaka sadržaj pepela u brašnu je rastao. Ipak, nakon povećanja specifičnog opterećenja iznad određene vrednosti dolazi do promene trenda uticaja i nakon čega sadržaj pepela u brašnu sa daljim povećanjem specifičnog opterećenja opada (Slika 4.16d). Scanlon i Dexter [82] su takođe razmatrali uticaj specifičnog opterećenja na sadržaj pepela u brašnu, ali su uticaj parametara ispitivali u opsegu od 0,5 do 1 kg/cm·min. Autori navode da je procenat pepela u uzorcima brašna rastao sa povećanjem specifičnog

opterećenja. Takođe, autori navode da je sa porastom obimne brzine valjaka udeo pepela u uzorcima dobijenog brašna opadao.



**Slika 4.16.** Trend uticaja parametara usitnjavanja na sadržaj pepela u brašnu

Takvi navodi u skladu su sa rezultatima dobijenim u ovom radu, kada je u pitanju uticaj ovih parametara usitnjavanja na sadržaj pepela u brašnu, dok Fišteš i Tanović [86] navode da povećanje obimnih brzina valjaka pri konstantnom prenosnom odnosu nije bilo praćeno promenom sadržaja pepela u brašnu.

### 4.2.3 Uticaj parametara usitnjavanja na potrošnju energije izražene u odnosu na masu usitnjenog materijala

Iako je na osnovu  $p$  vrednosti (Tabela 4.6) svaki linearni član ispoljio statistički značajan uticaj na posmatrani odziv, na osnovu Slike 4.17 može se zaključiti da je specifično opterećenje valjaka imalo izražen uticaj na posmatrani odziv. Linearni i kvadratni član ovog parametra u zbiru su imali doprinos uticaja od približno 40%. Dobijeni model imao je visok

koeficijent determinacije ( $R^2 = 0,9881$ ), dok vrednost za *lack of fit* nije bila značajna ( $p(LoF)=0,0942$ ):

$$y = 33,28 - 3,84A + 5,96B + 8,22C - 8,42D - 1,43AC + 1,48AD - 1,88BD + 1,03B^2 + 4,3D^2 \quad (4.94)$$

**Tabela 4.6.** ANOVA tablica za potrošnju energije izražene u odnosu na masu usitnjenog materijala i vrednost koeficijenta determinacije za predloženi model

Član	Suma kvadrata	df**	Srednja kvadratna greška	F-vrednost	p-vrednost
Model*	2415,82	9	268,42	156,95	< 0,0001
A-A : Razmak između valjaka	176,95	1	176,95	103,47	< 0,0001
B-B : Broj obrtaja brzohodnog valjka	426,69	1	426,69	249,49	< 0,0001
C-C : Prenosni odnos	811,1	1	811,1	474,25	< 0,0001
D-D : Specifčno opterećenje valjaka	851,57	1	851,57	497,91	< 0,0001
AC	8,17	1	8,17	4,78	0,0431
AD	8,79	1	8,79	5,14	0,0367
BD	14,09	1	14,09	8,24	0,0106
B <sup>2</sup>	6,79	1	6,79	3,97	0,0627
D <sup>2</sup>	118,27	1	118,27	69,15	< 0,0001
Residual	29,07	17	1,71		
Lack of Fit	28,69	15	1,91	10,04	0,0942
Greška	0,3812	2	0,1906		
Ukupno	2444,89	26			

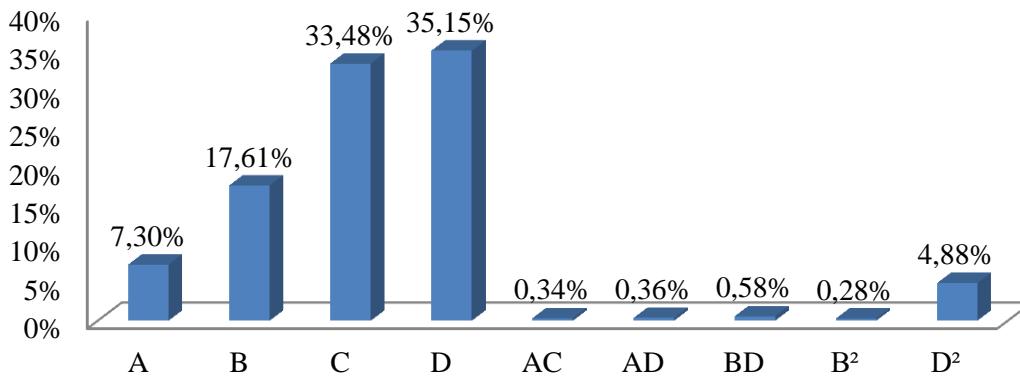
\*vrednost koeficijenta determinacije za predloženi model:  $R^2 = 0,9881$

\*\* broj stepeni slobode

Pretpostavka je da će sa višim specifičnim opterećenjem valjaka, odnosno većem masenom protoku materijala u mlevnom prostoru, biti potrebno više energije za usitnjavanje uzorka, odnosno da će vrednost odziva da raste. Međutim, na Slici 4.18 može se uočiti da je uticaj specifičnog opterećenja na posmatrani odziv bio suprotan. Razlog kontradiktornom uticaju posledica je jednačine koja je korišćena za izračunavanje vrednosti posmatranog odziva (3.5). Sa obzirom da je član koji predstavlja masu usitnjavanog materijala (M) konstantan ( $1000 \pm 0,01$  g), faktori koji utiču na vrednost potrošnje energije su snaga pri opterećenom hodu valjne stolice, odnosno tokom usitnjavanja materijala ( $P_w$ ) (uključuje i snagu potrebnu za pokretanje valjaka u praznom hodu, bez materijala) i vreme usitnjavanja (t). Vrednosti snage su varirali u rasponu od 0,99 do 2,11 kW, a može se primetiti da je povećanje specifičnog opterećenja uticalo na porast ove vrednosti. Međutim, sa porastom specifičnog opterećenja valjaka od 0,2 do 0,4 kg/cm·min, vreme usitnjavanja se značajno skratilo (u proseku sa 33 sekunde na 17 sekundi) u svim posmatranim eksperimentima. Sa obzirom da je vreme faktor



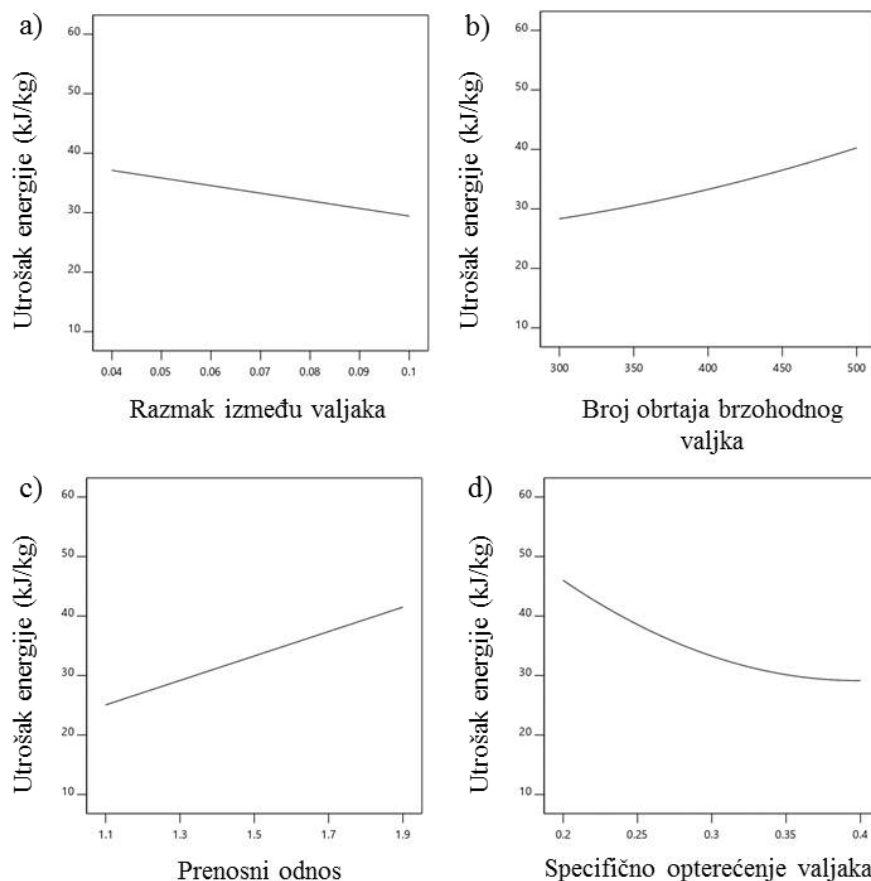
kojim se množi ceo član za proračun potrošnje energije, skraćeno vreme je ispoljilo mnogo veći uticaj na samu vrednost potrošnje od potrebne snage za pokretanje uređaja prilikom mlevenja. Stoga je porast specifičnog opterećenja valjaka ispoljio negativan uticaj na ukupnu potrošnju energije u odnosu na masu usitnjavanog materijala (Slika 4.18d).



**Slika 4.17.** Vrednost uticaja parametara usitnjavanja na potrošnju energije izražene u odnosu na masu usitnjenog materijala

Povećanje broja obrtaja brzohodnog valjka i prenosnog odnosa uticalo je na povećanje potrošnje energije. Pozitivan uticaj posmatranih parametara na odziv (Slika 4.18b i 4.18c) bio je očekivan, sa obzirom da je za potrebe održavanja broja obrtaja valjaka i prenosnog odnosa na višim nivoima potrebna veća pogonska snaga. Prema Posner-u i Hibbs-u [21] najekonomičniji način vođenja valjaka je da se drže na minimalnom broju obrtaja koji je neophodan da bi se ispratio željeni kapacitet. Sličan uticaj broja obrtaja i prenosnog odnosa na potrošnju energije u odnosu na masu samlevenog materijala uočili su i drugi autori u prethodnim istraživanjima [78,82,87,88].

Povećanje razmaka između valjaka uticalo je na smanjenje potrošnje energije (Slika 4.18a), jer je u slučajevima kada je razmak između valjaka širi manje snage potrebno da bi se prevazišao otpor čestica materijala. Ovakva opservacija u skladu je sa prethodnim istraživanjima [86,174].



**Slika 4.18.** Trend uticaja parametara usitnjavanja na ukupnu potrošnju energije u odnosu na masu usitnjavanog materijala

#### 4.2.4 Uticaj parametara usitnjavanja na potrošnju energije izražene u odnosu na masu dobijenog brašna

Potrošnja energije u odnosu na masu dobijenog brašna odziv je koji je u direktnoj relaciji sa prvim posmatranim odzivom, odnosno sa prinom brašna i može da se posmatra kao posledica mase dobijenog brašna u datom eksperimentu (3.6). Iz ANOVA tabele (Tabela 4.7) moguće je primetiti da su linearni član razmaka između valjaka, član interakcije razmaka između valjaka i specifičnog opterećenja i kvadratni član prenosnog odnosa ispoljili statistički najznačajniji uticaj na posmatrani odziv ( $p < 0,05$ ). Model je imao vrednost koeficijenta determinacije od  $R^2 = 0,8294$ , dok vrednost za *lack of fit* nije bila značajna ( $p(LoF) = 0,2246$ ).

$$y = 259,07 + 38,45A - 2,62B + 1,48C - 12,62D + 19,58AB - 38,2AD + 20,32BC + 12,78CD + 22,09A^2 + 65,23C^2 \quad (4.95)$$

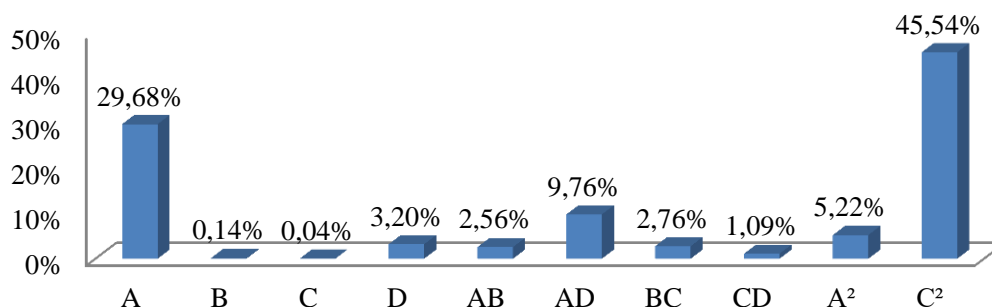
**Tabela 4.7.** ANOVA tablica za potrošnju energije izražene u odnosu na masu dobijenog brašna i vrednost koeficijenta determinacije za predloženi model

Član	Suma kvadrata	df**	Srednja kvadratna greška	F-vrednost	p-vrednost
Model*	57212,91	10	5721,29	7,78	0,0002
A-A : Razmak između valjaka	17744,24	1	17744,24	24,12	0,0002
B-B : Broj obrtaja brzohodnog valjka	82,51	1	82,51	0,1121	0,7421
C-C : Prenosni odnos	26,37	1	26,37	0,0358	0,8522
D-D : Specifčno opterećenje valjaka	1911,19	1	1911,19	2,6	0,1266
AB	1532,82	1	1532,82	2,08	0,1682
AD	5838,44	1	5838,44	7,94	0,0124
BC	1651,05	1	1651,05	2,24	0,1536
CD	653,15	1	653,15	0,8878	0,3601
A <sup>2</sup>	3122,31	1	3122,31	4,24	0,056
C <sup>2</sup>	27228,03	1	27228,03	37,01	< 0,0001
Residual	11771,68	16	735,73		
Lack of Fit	11351,59	14	810,83	3,86	0,2246
Greška	420,08	2	210,04		
Ukupno	68984,59	26			

\* vrednost koeficijenta determinacije za predloženi model:  $R^2 = 0,8294$

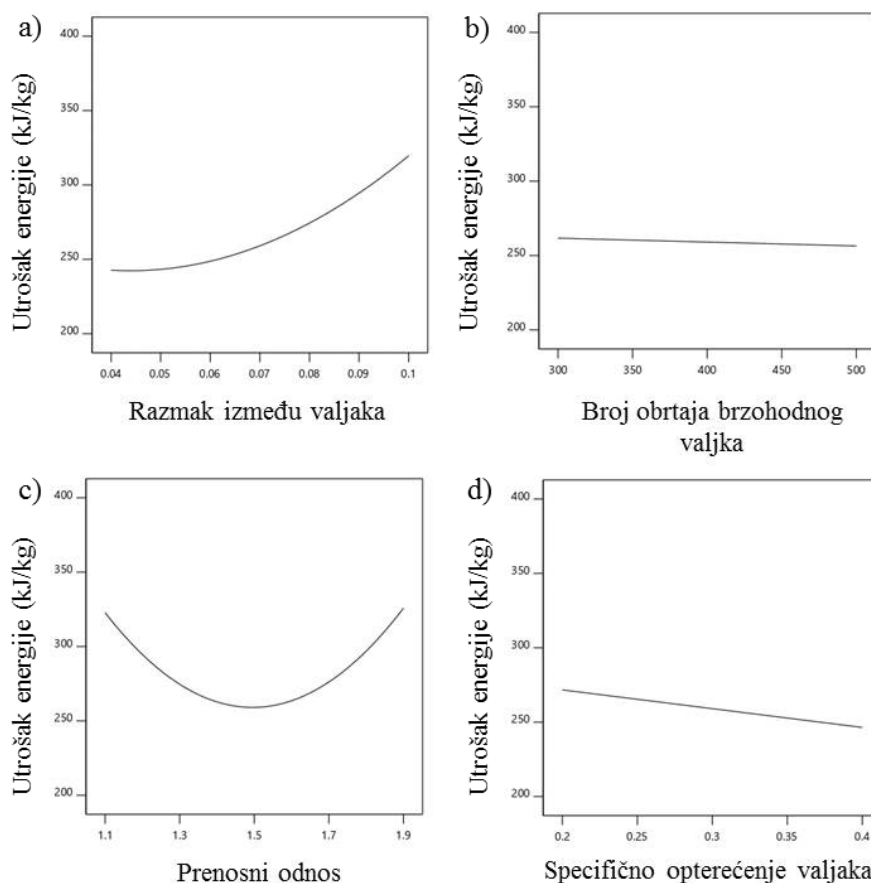
\*\* broj stepeni slobode

Slično se može zaključiti i sa slike koja prikazuje vrednosti doprinosa parametara na posmatrani odziv (Slika 4.19).



**Slika 4.19.** Vrednost uticaja parametara usitnjavanja na potrošnju energije izražene u odnosu na masu dobijenog brašna

Ukoliko trend uticaja parametara na posmatrani odziv (Slika 4.20) uporedimo sa trendom uticaja parametara na prinos brašna (Slika 4.16) moguće je primetiti da su svi parametri ispoljili suprotan trend uticaja na posmatrane odzive, osim specifičnog opterećenja valjaka koji je za oba odziva imao negativan uticaj.



**Slika 4.20.** Trend uticaja parametara usitnjavanja na ukupnu potrošnju energije u odnosu na masu dobijenog brašna

Ovakav trend uticaja bio je očekivan i posledica je proračuna datog jednačinom (3.6). Sa slika 4.20a i 4.20b moguće je primetiti da je smanjenje razmaka između valjaka i povećanje obimne brzine valjaka uticalo na smanjenje potrošnje energije u odnosu na masu dobijenog brašna, a što je direktna posledica činjenice da se pri manjem razmaku i većim obimnim brzinama ostvaruje veći prinos brašna. Sa druge strane, kao i u slučaju prinosa brašna, prenosni odnos ispoljio je dvojaku prirodu uticaja na potrošnju energije u odnosu na masu dobijenog brašna (Slika 4.20c), što sugerise i visoka vrednost kvadratnog člana prenosnog odnosa ( $C^2 = 45,54\%$ ; Slika 4.19). Prvobitno se sa povećanjem prenosnog odnosa od 1,1 do 1,5 potrošnja energije smanjila, dok je sa daljim povećanjem prenosnog odnosa potrošnja rasla. Pomenuti uticaj direktno je povezan sa trendom uticaja prenosnog odnosa na prinos brašna. Kao što je prethodno opisano, povećanjem prenosnog odnosa do vrednosti od 1,65 prinos brašna je rastao. Ovakvo povećanje prinosa brašna smanjilo je vrednost odziva za

potrošnju energije u odnosu na masu dobijenog brašna. Nakon što se prenosni odnos povećao iznad 1,65 prinos brašna počeo je da opada, što je posledično povećalo i vrednosti odziva za potrošnju energije. Primetno je da su vrednosti prelomne tačke, kod koje dolazi do promena trenda uticaja prenosnog odnosa na prinos brašna, odnosno na potrošnju energije u odnosu na masu dobijenog brašna imale približne vrednosti za dva slučaja ( $i=1,65$  i  $i=1,5$ , respektivno). Specifično opterećenje valjaka je jedini parametar koji je ispoljio isti – negativan trend uticaja na prinos brašna i na potrošnju energije (Slika 4.16d i Slika 4.20d). Objašnjenje ovakvog fenomena je kao što je objašnjeno u prethodnom poglavlju, posledica činjenice da je sa većim specifičnim opterećenjem potrebno manje vremena za usitnjavanje materijala, što rezultira smanjenom potrošnjom energije za usitnjavanje izražene u odnosu na masu dobijenog brašna.

#### 4.2.5 Optimizacija postupka usitnjavanja pšeničnog griza primenom metode odzivne površi

Jedna od glavnih prednosti primene metode odzivne površine jeste mogućnost optimizacije procesa spram većeg broja odziva u okviru ispitivanog, eksperimentalnog domena. Postupak optimizacije podrazumeva dobijanje modela za svaki odziv, a potom pronalaženje kombinacije ulaznih parametara pri kojim će izlaziti biti na optimalnim vrednostima ili barem u okviru željenog intervala vrednosti [140]. Modeli dobijeni ispitivanjima u okviru ove disertacije iskorišćeni su da bi se parametri usitnjavanja (razmak između valjaka, broj obrtaja brzohodnog valjka, prenosni odnos i specifično opterećenje valjaka) postavili na takav način da se usitnjavanjem pri takvim uslovima postignu željene vrednosti prinosa brašna, sadržaja pepela u brašnu, potrošnje energije u odnosu na masu samlevenog materijala i u odnosu na masu dobijenog brašna. Razmatrana su četiri različita slučaja zavisno od ciljanih odziva, a u sva četiri slučaja ulazni parametri bili su u opsegu vrednosti ispitivanog eksperimentalnog domena (Tabela 4.8). Na efekte usitnjavanja mlinskim valjcima utiču fizičko-hemijska i strukturno mehanička svojstva materijala koji se usitjava i parametri usitnjavanja [7]. Za razliku od prve faze istraživanja u kojoj se spram unapred postavljenih – željenih efekata usitnjavanja na prolazištima u fazi krupljenja, primenom povratnih matrica usitnjavanja, tražila optimalna raspodela veličina zrna (polaznog materijala), u drugoj fazi istraživanja je metoda odzivne površi upotrebljena za pronalaženje optimalne kombinacije parametara usitnjavanja, a spram unapred postavljenih kvantitativnih, kvalitativnih i energetskih pokazatelja efektivnosti usitnjavanja griza glatkim valjcima. Rezultati definisanih optimizacija (po pet kombinacija sa najvećim zadovoljenjem uslova) prikazani su u tabelama 4.9 – 4.12, mada je moguće primetiti da nisu postajale značajne razlike između različitih kombinacija ulaznih parametara i tako ostvarenih rezultata.

U prvom primeru (Tabela 4.8 i 4.9) ispitivani parametri trebali su da budu postavljeni tako da se postigne maksimalan prinos brašna, a minimalne vrednosti sadržaja pepela u brašnu i potrošnje energije u odnosu na usitnjavani materijal. Nizak nivo postignutog zadovoljenja (63,11%) za sve predložene kombinacije rešenja sugerise da posmatrani odzivi na neki način utiču jedni na druge i da je zbog toga onemogućen viši nivo zadovoljenja.

**Tabela 4.8.** Ciljane vrednosti i opsezi parametara usitnjavanja i odziva

Ulazni parametri		Ciljana vrednost parametara	Granične vrednosti parametara	
			Donja	Gornja
A: Razmak između valjaka [mm]		u okviru ispitivanog domena	0,04	0,1
B: Broj obrtaja brzohodnog valjka [o/min]		u okviru ispitivanog domena	300	500
C: Prenosni odnos		u okviru ispitivanog domena	1,1	1,9
D: Specifično opterećenje valjaka [kg/cm·min]		u okviru ispitivanog domena	0,2	0,4
Primer	Odzivi	Ciljana vrednost odziva	Granične vrednosti za izlaze	
			Donja	Gornja
1	R1: prinos brašna (%)	maksimalna	5,56	21,76
	R2: sadržaj pepela u brašnu (%) <sub>sm</sub>	minimalna	0,36	0,45
	R3: potrošnja energije (kJ/kg) u odnosu na masu usitnjenog materijala	minimalna	19,69	55,6
2	R2: sadržaj pepela u brašnu (%) <sub>sm</sub>	minimalna	0,36	0,45
	R3: potrošnja energije (kJ/kg) u odnosu na masu usitnjenog materijala	minimalna	19,69	55,6
	R4: potrošnja energije (kJ/kg) u odnosu na masu dobijenog brašna	minimalna	232,21	397,43
3	R1: prinos brašna (%)	maksimalna	5,56	21,76
	R2: sadržaj pepela u brašnu (%) <sub>sm</sub>	minimalna	0,36	0,45
	R4: potrošnja energije (kJ/kg) u odnosu na masu dobijenog brašna	minimalna	232,21	397,43
4	R1: prinos brašna (%)	maksimalna	5,56	21,76
	R2: sadržaj pepela u brašnu (%) <sub>sm</sub>	minimalna	0,36	0,45
	R3: potrošnja energije (kJ/kg) u odnosu na masu usitnjenog materijala	minimalna	19,69	55,6
	R4: potrošnja energije (kJ/kg) u odnosu na masu dobijenog brašna	minimalna	232,21	397,43

U konkretnom slučaju, zarad maksimizacije prinosa brašna razmak između valjaka i specifično opterećenje valjaka treba postaviti na niže vrednosti, dok prenosni odnos i obimna brzina valjaka treba da bude na većim nivoima, što se može zaključiti na osnovu trenda uticaja parametara usitnjavanja na posmatrani odziv (Poglavlje 4.2.1, Slika 4.15). Međutim, takva kombinacija ulaznih parametara utiče na povećanje potrošnje energije u odnosu na masu usitnjenog materijala (Poglavlje 4.2.3, Slika 4.18), čime je onemogućena uspešna optimizacija svih posmatranih odziva, odnosno zadovoljenje svih zahteva.

**Tabela 4.9.** Vrednosti parametara usitnjavanja, odziva i zadovoljenja (Primer 1)

Ulazni parametri				Odzivi			Zadovoljenje (%)
A [mm]	B [o/min]	C	D [kg/cm·min]	R1 (%)	R2 [kJ/kg]	R3 [kJ/kg]	
0,05	500	1,27	0,31	15,65	0,38	36,86	63,11
0,05	500	1,27	0,31	15,63	0,38	36,84	63,11
0,05	500	1,27	0,31	15,67	0,38	36,88	63,11
0,05	500	1,27	0,31	15,58	0,38	36,67	63,11
0,05	500	1,27	0,3	15,74	0,38	37,09	63,11

Prethodno pomenuta tvrdnja potvrđena je i Primerom 2, u kom su posmatrani odzivi bili sadržaj pepela, i potrošnja energije u odnosu na masu usitnjenog materijala i u odnosu na dobijenu masu brašna (Tabela 4.10). Parametri su postavljeni tako da smanje potrošnju energije, a kako ova tri odziva ne utiču jedni na druge dominantno kao u Primeru 1 (gde promena parametara koji doprinose većem prinosu brašna istovremeno doprinosi povećanju utroška energije u odnosu na masu usitnjavanog materijala), postignuto zadovoljenje je bilo veće (87,3%). Štaviše, na osnovu jednačine (3.7) date u Eksperimentalnom delu disertacije, moguće je zaključiti da veća masa brašna (u jednačini označena sa  $m$ ) utiče na smanjenje utroška energije (u jednačini označeno sa  $E$ ). Međutim, važno je napomenuti da bi prinos brašna pri predloženim parametrima bio nizak i iznosio bi oko 10%.

**Tabela 4.10.** Vrednosti parametara usitnjavanja, odziva i zadovoljenja (Primer 2)

Ulazni parametri				Odzivi			Zadovoljenje (%)
A [mm]	B [o/min]	C	D [kg/cm·min]	R2 (%) <sub>sm</sub>	R3 [kJ/kg]	R4 [kJ/kg]	
0,065	499,99	1,21	0,4	0,36	28,56	250,09	87,3
0,065	499,99	1,21	0,4	0,36	28,58	249,89	87,3
0,065	499,99	1,21	0,4	0,36	28,49	250,61	87,3
0,065	499,99	1,21	0,4	0,36	28,67	249,31	87,3
0,065	499,99	1,21	0,4	0,36	28,56	250,02	87,3

Primer 3 ilustruje slučaj u kom je postignuto maksimalno zadovoljenje od 100% (Tabela 4.11). U navedenim primerima bilo je moguće postaviti kombinaciju ulaznih parametara na taj način da se ostvari maksimalan prinos brašna, a da se istovremeno ne utiče na povećanje energetske zahteva. Ovo je očekivano, sa obzirom da je pokazano da je potrošnja energije u odnosu na masu dobijenog brašna u direktnoj vezi sa prinosom brašna i da povećanje u

prinosu brašna utiče na smanjenje potrošnje energije. Naravno, maksimalno zadovoljenje omogućeno je i zbog prethodno pomenute činjenice da selektivnost usitnjavanja nije značajno zavisila od parametara usitnjavanja, sa obzirom da je polazni uzorak homogen. Zbog toga su zahtevane vrednosti za sadržaj pepela u brašnu bile ostvarive u svim eksperimentima bez uticaja na zadovoljenje optimizacije.

**Tabela 4.11.** Vrednosti parametara usitnjavanja, odziva i zadovoljenja (Primer 3)

Ulazni parametri				Odzivi			Zadovoljenje (%)
A [mm]	B [o/min]	C	D [kg/cm·min]	R1 (%)	R2 (%) <sub>sm</sub>	R4 [kJ/kg]	
0,04	495,27	1,3	0,2	21,91	0,36	213,98	100
0,04	492,07	1,28	0,2	21,78	0,36	214,40	100
0,04	499,9	1,28	0,21	21,79	0,36	213,37	100
0,05	496,44	1,32	0,2	22,18	0,36	214,07	100
0,04	490,39	1,28	0,2	21,81	0,36	214,98	100

U poslednjem primeru, sva četiri odziva posmatrana su zajedno. Kao što je i očekivano, u odnosu na prethodni primer zadovoljenje je smanjeno na 70,66%, a kao posledica činjenice da posmatrani odzivi utiču jedan na druge, odnosno da parametri koji odgovaraju zadovoljenju jednog odziva nisu pogodni za zadovoljenje nekog drugog odziva (u konkretnom slučaju ponovo je reč o odzivima R1 i R3, odnosno o prinosu brašna i utrošku energije u odnosu na masu usitnjavanog materijala). Stoga je predložena kompromisna kombinacija ulaznih parametara. Razmak između valjaka i prenosni odnos postavljeni su na niže vrednosti, (približno oko 0,05 mm i 1,3, respektivno), obimna brzina brzohodnog valjka povećana je na maksimalnu vrednost (500 o/min), dok je specifično opterećenje valjaka postavljeno na srednju vrednost (0.3 kg/cm·min). Predviđene vrednosti posmatranih odziva za predloženu kombinaciju ulaznih parametara tada su bili: prinos brašna 16%, sadržaj pepela u brašnu 0,38%, potrošnja energije u odnosu na masu usitnjenog materijala 37,8 kJ/kg i potrošnja energije u odnosu na masu dobijenog brašna 232,2 kJ/kg (Tabela 4.12).

**Tabela 4.12.** Vrednosti parametara usitnjavanja, odziva i zadovoljenja (Primer 4)

Ulazni parametri				Odzivi				Zadovoljenje (%)
A [mm]	B o/min]	C	D [kg/cm·min]	R1 (%)	R2 (%) <sub>sm</sub>	R3 [kJ/kg]	R4 [kJ/kg]	
0,05	500	1,3	0,3	16,25	0,38	37,79	232,21	70,66
0,05	500	1,3	0,3	16,29	0,38	37,88	232,21	70,66
0,05	500	1,29	0,3	16,26	0,38	37,82	232,21	70,66
0,05	500	1,3	0,31	16,20	0,38	37,67	232,22	70,66
0,05	500	1,29	0,31	16,22	0,38	37,75	232,21	70,66



#### 4.2.6 Metoda odzivne površi - zaključna razmatranja

Metoda odzivne površi pokazala se kao pogodan metod za analizu uticaja parametara usitnjavanja na pokazatelje efektivnosti usitnjavanja mlinskim valjcima. Primenom metode odzivne površi moguće je nadomestiti nedostatak metode matrica usitnjavanja koje su upotrebljive za modelovanje postupka usitnjavanja pri konstantnim parametrima usitnjavanja.

Modeli dobijeni metodom odzivne površi na adekvatan način opisuju uticaj promene parametara usitnjavanja na pokazatelje efektivnosti usitnjavanja, a trendovi uticaja parametara usitnjavanja na posmatrane odzive u skladu su sa prethodnim istraživanjima i literaturnim podacima.

U tom kontekstu moglo bi se zaključiti da se metoda odzivne površi, poput matrica usitnjavanja, uspešno može primeniti za modelovanje postupka usitnjavanja u direktnom smeru.

Sa druge strane, ukoliko bismo postupak optimizacije metodom odzivne površine posmatrali paralelno sa reverzibilnim oblikom matrica usitnjavanja, uvideli bismo da su, kao i u slučaju povratnih matrica usitnjavanja, prisutna određena ograničenja.

Metodom odzivne površine moguće je pronaći kombinaciju parametara usitnjavanja pri kojima će pokazatelji efektivnosti usitnjavanja biti na željenim vrednostima jedino u situacijama kada zahtevani odzivi ne utiču jedni na druge, odnosno kada parametri koji pogoduju zadovoljenju jednog odziva ne utiču negativno na zadovoljenje drugog odziva. Međutim, ukoliko postoji zahtev da se postupak usitnjavanja optimizuje spram izlaza koji su međusobno suprotstavljeni, dobiće se kompromisna kombinacija ulaznih parametara koji će samo u određenom stepenu zadovoljiti postavljene zahteve.

## 5.0 ZAKLJUČCI

Na osnovu diskusije eksperimentalnih rezultata predstavljenih u okviru ove doktorske disertacije mogu se izvući sledeći zaključci:

- Koncept matrica usitnjavanja moguće je primeniti za kontrolu uticaja koji karakteristike usitnjavanog materijala imaju na kvantitativne (prinos pojedinih frakcija, prinos ukupnog izvoda, prinos brašna) i kvalitativne (sadržaj pepela) pokazatelje efektivnosti usitnjavanja.
- Jednom definisane za određene parametre mlevenja i prosejavanja, matrice usitnjavanja moguće je primeniti samo za istovetne parametre mlevenja i prosejavanja.
- Primenom matrica usitnjavanja moguće je, za datu raspodelu veličina zrna na ulazu, predvideti raspodelu veličina čestica mliva nakon usitnjavanja. Koncept je moguće primeniti za pojedinačna prolazišta krupljenja, kao i za uzastopna prolazišta krupljenja. Na osnovu raspodele veličine čestica nakon usitnjavanja moguće je odrediti vrednosti kvantitativnih pokazatelja od važnosti, kao što su: prinos pojedinih frakcija, prinos ukupnog izvoda, prinos brašna i potencijalni prinos brašna u mlinu.
- Koncept matrica usitnjavanja moguće je primeniti i u povratnom (reverzibilnom) obliku. Za zadati prinos ukupnog izvoda na nekom od prolazišta krupljenja moguće je definisati raspodelu veličina zrna na ulazu čijim će se usitnjavanjem postići željena vrednost prinosa ukupnog izvoda. Definisani izvod određuje i prinos ukupnog izvoda na preostala dva prolazišta krupljenja, a time i potencijalni prinos brašna u mlinu. Teorijski broj potencijalnih rešenja, odnosno broj kombinacija raspodela veličina zrna pšenice na ulazu, je ogroman, a pojedina rešenja mogu da budu i praktični neizvodljiva – predloženi udeo određene frakcije negativan ili veći od 1.
- Da bi se izbegla praktični neprimenjiva rešenja moguće je definisati dopustivu oblast za izbor prinosa ukupnog izvoda na nekom od prolazišta ili za odabir kumulativnog prinosa ukupnog izvoda. Tu oblast određuju članovi prve vrste matrica usitnjavanja prvog krupača, odnosno prinos ukupnog izvoda ostvaren na prvom prolazištu krupljenja.
- Odabirom vrednosti prinosa ukupnog izvoda za prvi krupač, iz dopustivog opsega, definiše se interval za odabir masenog udela jedne frakcije ulaza (zrna). Odabrani maseni udeo jedne frakcije zrna diktira udele preostalih frakcija zrna, a time i raspodelu veličina čestica zrna pšenice čijim će se usitnjavanjem dobiti željeni prinosi ukupnog izvoda na prolazištima krupljenja.

- Dodatno, mogu se zadati i željeni intervali vrednosti za prinos pojedinih frakcija mliva, čime se oblast dopustivih rešenja smanjuje.
- Primenu matricnih jednačina u reverzibilnom obliku moguće je proširti i na kontrolu kvalitativnih pokazatelja efekata usitnjavanja kao što je sadržaj pepela u frakcijama mliva. Zavisno od zahteva moguće je primeniti dva različita pristupa: precizan i približan.
- Za definisanu matricu usitnjavanja za predviđanje sadržaja neke hemijske komponente u frakcijama mliva i poznat sadržaj pepela u frakcijama zrna, moguće je odrediti raspodelu veličina zrna čijim će se usitnjavanjem dobiti željene vrednosti raspodele veličine čestica mliva, kao i sadržaja pepela u njima.
- Preciznim pristupom moguće je pronaći odgovarajuću raspodelu veličine zrna na ulazu koja će voditi do željenih vrednosti masenih udela za dve proizvoljno odabrane frakcije mliva (broj frakcija koje mogu da se odaberu zavisi od formata matrice). Takođe, moguće je zadavanje masenog udela jedne, željene frakcije mliva, uz istovremen odabir vrednosti masenog udela jedne frakcije zrna ili sadržaj pepela u jednoj frakciji mliva i maseni udeo jedne frakcije zrna. Kako bi predložena rešenja imala praktični smisao, vrednosti za zahtevani maseni udeo frakcija mliva ili sadržaj pepela u njima treba odabrati iz dopustive oblasti koju definišu članovi odgovarajućih vrsta matrica usitnjavanja, odnosno matrice za predviđanje sadržaja neke hemijske komponente u frakcijama mliva.
- Preciznim pristupom moguće je pronaći i odgovarajuću raspodelu veličine zrna koja će voditi do željenih vrednosti za sadržaj pepela u dve (proizvoljno odabrane) frakcije mliva ili do željenih vrednosti za istovremeno odabrane vrednosti za maseni udeo jedne frakcije mliva i sadržaj pepela u njoj. Vrednosti za odabir dopustivih rešenja diktiraju elementi odgovarajućih vrsta odgovarajućih matrica, a predložena raspodela veličine zrna i sadržaj pepela u frakcijama zrna određuju i raspodelu veličine čestica i sadržaj pepela u mlivu.
- U okviru približnog pristupa moguće je zadati željene vrednosti za masene udele svih frakcija mliva ili željene vrednosti za sadržaj pepela u svim frakcijama mliva. Takođe, moguće je istovremeno zadati željene vrednosti za sve frakcije zrna i sadržaj pepela u njima. Primenom semilog norme moguće je dobiti raspodelu veličine zrna koja će dovesti do približnih rešenja, sa koeficijentom determinacije  $R^2=0,9999$ . U slučaju kada je zadat sadržaj pepela u frakcijama mliva, dobijeno rešenje za raspodelu veličine zrna definiše raspodelu veličine čestica mliva.
- U slučaju kada se parametri variraju tokom postupka mlevenja za ispitivanje uticaja takve promene na efekte usitnjavanja i za optimizovanje postupka usitnjavanja može se primeniti metoda odzivne površi.

- Primenom metode odzivne površi ustanovljeno je da promena razmaka između valjaka, broja obrtaja valjaka, prenosnog odnosa i specifičnog opterećenja valjaka imaju statistički značajan uticaj na kvantitativne (prinos brašna) i energetske (utrošak energije izražen u odnosu na masu usitnjenog materijala i utrošak energije izražen u odnosu na masu dobijenog brašna) pokazatelje efektivnosti mlevenja prečišćenog pšeničnog griza primenom glatkih valjaka.
- Promena posmatranih parametra usitnjavanja ne ispoljava statistički značajan uticaj na kvalitativne (sadržaj pepela u brašnu) pokazatelje efektivnosti usitnjavanja u slučaju kada je polazni uzorak izraženo homogen u pogledu hemijskog sastava. Praktično, bilo koja promena parametara usitnjavanja ne može da naruši selektivnost usitnjavanja u slučajevima kada je usitnjavani materijal homogen po posmatranom svojstvu.
- Svi posmatrani parametri ispoljavaju statistički značajan uticaj na prinos brašna, a prenosni odnos se izdvaja kao najuticajniji sa ukupnim doprinosom uticaja većim od 30%. Prinos brašna raste sa smanjenjem razmaka između valjaka i specifičnog opterećenja valjaka i sa povećanjem broja obrtaja valjaka. Trend uticaja prenosnog odnosa karakteriše prisustvo prelomne tačke. Povećanjem prenosnog odnosa do vrednosti od  $i=1,65$ , što se definiše kao prelomna tačka, moguće je povećati prinos brašna. Daljim povećanjem prenosnog odnosa prinos brašna smanjuje.
- Sadržaj pepela u brašnu raste sa povećanjem razmaka između valjaka i prenosnog odnosa, a opada sa povećanjem broja obrtaja valjaka i specifičnog opterećenja. Ipak, sa obzirom da je u eksperimentima sprovedenim u okviru ove disertacije polazni uzorak bio prečišćeni griz sa vrlo niskim sadržajem pepela, nijedan od parametara usitnjavanja nije ispoljio statistički značajan uticaj na sadržaj pepela u dobijenom brašnu.
- Svi ispitivani parametri ispoljavaju statistički značajan uticaj na utrošak energije izražen u odnosu na masu usitnjenog materijala. Specifično opterećenje valjaka izdvaja se kao najuticajniji parametar sa ukupnim doprinosom uticaja većim od 40%, pri čemu navedeni parametar ispoljava negativnu funkciju uticaja. Razmak između valjaka takođe je ispoljio negativnu funkciju uticaja na posmatrani odziv, dok je povećanjem broja obrtaja valjaka i prenosnog odnosa posmatrani odziv rastao.
- Najveći uticaj na utrošak energije izražen u odnosu na masu dobijenog brašna ispoljili su prenosni odnos i razmak između valjaka. Utrošak energije izražen u odnosu na masu dobijenog brašna u vezi je sa prinosom brašna, te su promene parametara usitnjavanja koje su vodile smanjenju prinosa brašna – povećanje razmaka između valjaka i povećanje prenosnog odnosa nakon prelomne tačke – istovremeno uticale na povećanje utroška energije izražene u odnosu na masu dobijenog brašna.

- Uspešna optimizacija postupka usitnjavanja primenom metode odzivne površi sa maksimalnim zadovoljenjem moguća je u slučaju kada posmatrani odzivi nisu međusobno suprotstavljeni, odnosno kada parametri koji odgovaraju zahtevanim vrednostima jednog odziva ne utiču negativno na zadovoljenje drugog odziva.
- U slučaju optimizacije kada su sva četiri odziva posmatrana zajedno predložena kombinacija ulaznih parametara je bila: razmak između valjaka 0,05 mm, prenosni odnos 1,3, broj obrtaja brzohodnog valjka 500 o/min i specifično opterećenje valjaka 0.3 kg/cm•min. Predviđene vrednosti posmatranih odziva za predloženu kombinaciju ulaznih parametara tada su bili: prinos brašna 16%, sadržaj pepela u brašnu 0,38%, utošak energije izražen u odnosu na masu usitnjenog materijala 37,8 kJ/kg i utrošak energije izražen u odnosu na masu dobijenog brašna 232,2 kJ/kg, a zadovoljenje je bilo 70,66%.

## 6.0 LITERATURA

- [1] R.P. Patel, A.H. Baria, N.A. Patel, An overview of size reduction technologies in the field of pharmaceutical manufacturing, *Asian J. Pharm.* 2 (2008).
- [2] J. Baxter, A. Abu-nahar, U. Tüzün, The breakage matrix approach to inadvertent particulate degradation : dealing with intra-mixture interactions, *Powder Technol.* 143 (2004) 174–178.
- [3] C.L. Prasher, *Crushing and grinding process handbook*, John Wiley & Sons, 1987.
- [4] E. Haque, Application of size reduction theory to roller mill design and operation, *Cereal Foods World.* 36 (1991) 368–375.
- [5] R.L. Earle, *Unit operations in food processing*, 2nd ed., Elsevier, 2013.
- [6] R.G. Holdich, *Fundamentals of particle technology*, Midland Information Technology and Publishing, 2002.
- [7] M.G. Scanlon, J. Lamb, Fracture mechanisms and particle shape formation during size reduction of a model food material, *J. Mater. Sci.* 30 (1995) 2577–2583.
- [8] G.M. Campbell, P.J. Bunn, C. Webb, S.C.W. Hook, On predicting roller milling performance: Part II. The breakage function, *Powder Technol.* 115 (2001) 243–255.
- [9] P. Rittinger, *Lehrbruch der Aufbreitungskunde* (cit. prema Ястребов П.П, 1973.), 1867.
- [10] F. Kick, *Das Gesetzt, der Proportionalen Widerstände und seine Anwendungen* (cit. prema Ястребов, П.П, 1973.), Leipzig, 1855.
- [11] В.Л. Кирпичев, О подобии при упругих явлениях (cit. prema Ястребов П.П, 1973.), *Журнал Русского Химического и Физического Общества.* (1874).
- [12] П.А. Ребиндер, Физико-химические исследования процессов деформации твердых тел. (cit. prema Ястребов П.П, 1973.), in: *Сборник АН СССР*, 1947.
- [13] N. Ponce-García, B. Ramírez-Wong, A. Escalante-Aburto, P.I. Torres-Chávez, J. de D. Figueroa-Cárdenas, Mechanical Properties in Wheat (*Triticum aestivum*) Kernels Evaluated by Compression Tests: A Review, in: M.F. El-Amin (Ed.), *Viscoelastic Viscoplastic Mater.*, 1st ed., InTech, Rijeka, Croatia, 2016: pp. 21–33.
- [14] Г.А. Егоров, *Технологические свойства зерна*, Агропромиздат, Москва, 1985.
- [15] P. Fellows, *Food Processing Technology: Principles and Practice*, Ellis Horwood Ltd., Chichester, UK, 1988.
- [16] K. Patil, *Mechanical Operations Fundamental Principles and Applications*, Nirali Prakashan, 2007.
- [17] E. Bilgili, M. Capece, Quantitative analysis of multi-particle interactions during particle breakage : A discrete non-linear population balance framework, *Powder Technol.* 213 (2011) 162–173.

- [18] E. Bilgili, M. Capece, *Chemical Engineering Research and Design* A rigorous breakage matrix methodology for characterization of multi-particle interactions in dense-phase particle breakage, *Chem. Eng. Res. Des.* 90 (2012) 1177–1188.
- [19] A. Fišteš, G. Tanović, *Praktikum iz tehnologije mlinarstva*, Tehnološki fakultet, Univerzitet u Novom Sadu, Novi Sad, 2014.
- [20] T. Evers, S. Millar, *Cereal Grain Structure and Development : Some Implications for Quality*, 36 (2002) 261–284.
- [21] E.S. Posner, A.N. Hibbs, *Wheat flour milling*, American Association of Cereal Chemists, St. Paul, Minnesota, 2005.
- [22] F. Mabilie, J. Abecassis, *Parametric Modelling of Wheat Grain Morphology : a New Perspective*, 37 (2003) 43–53.
- [23] A.D. Evers, D.B. Bechtel, *Microscopic structure of the wheat grain*, in: Y. Pomeranz (Ed.), *Wheat Chem. Technol.*, 3rd ed., American Association of Cereal Chemists, St. Paul, Minnesota, 1988: pp. 47–95.
- [24] Г.А. Егоров, *Влияние тепла и влаги на процессы переработки и хранения зерна*, Колос, Москва, 1973.
- [25] P. Haridas Rao, G.V. Kumar, G.C.P. Ranga Rao, S.R. Shurpalekar, *Studies on stabilisation of wheat germ*, *Leb. Technol.* 13 (1980) 302–307.
- [26] R. Amadò, E. Arrigoni, *Nutritive and functional properties of wheat germ*, 1992.
- [27] S.N. Al-Hooti, J.S. Sidhu, J.M. Al-Saqer, A. Al-Othman, *Effect of raw wheat germ addition on the physical texture and objective color of a designer food ( pan bread )*, *Food / Nahrung.* 46 (2002) 68–72.
- [28] A. Brandolini, A. Hidalgo, *Wheat germ: not only a by-product*, *Int. J. Food Sci. Nutr.* 63 (2012) 71–74.
- [29] S. Zhokhov, A. Broberg, L. Kenne, J. Jastrebova, *Content of antioxidant hydroquinones substituted by beta-1,6-linked oligosaccharides in wheat milled fractions, flours and breads*, *Food Chem.* 121 (2010) 645-652.
- [30] A. Kan, *Chemical and elemental characterization of wheat germ oil (Triticum spp. L.) cultivated in Turkey*, *African J. Agric. Res.* 7 (2012) 4979-4982.
- [31] E.S. Posner, *The Technology of wheat germ separation in flour mills*, *Assoc. Oper. Millers-Bulletin.* (1985) 4577–4592.
- [32] E.J. Bass, *Wheat flour milling*, in: Y. Pomeranz (Ed.), *Wheat Chem. Technol.*, 3rd ed., American Association of Cereal Chemists, St. Paul, Minnesota, 1988: pp. 1–68.
- [33] Y. Pomeranz, *Chemical composition of kernel structure*, in: Y. Pomeranz (Ed.), *Wheat Chem. Technol.*, 3rd ed., American Association of Cereal Chemists, St. Paul, Minnesota, 1988: pp. 97–158.
- [34] A. Fišteš, *Prilog proučavanju mogućnosti racionalizacije tehnološkog postupka mlevenja pšenice primenom osmovaljne stolice*, Univerzitet u Novom Sadu, Novi Sad, 2009.

- [35] J.A. Gwirtz, M.R. Willyard, K.L. McFall, Wheat: More than just a Plant, in: L. Popper, W. Schäfer, W. Freund (Eds.), *Futur. Flour A Compend. Flour Improv.*, AgriMedia, 2006: pp. 1–3.
- [36] M. Žeželj, *Tehnologija žita i brašna: poznavanje čuvanje i prerada žita*, Tehnološki fakultet u Novom Sadu, Zavod za tehnologiju žita, Novi Sad, 1995.
- [37] S. Peyron, A. Surget, F. Mabile, J.C. Autran, X. Rouau, J. Abecassis, Evaluation of Tissue Dissociation of Durum Wheat Grain ( *Triticum durum* Desf .) Generated by the Milling Process, *J. Cereal Sci.* 36 (2002) 199–208.
- [38] M. Peng, M. Gao, P. Hucl, R.N. Chibbar, Separation and Characterization of A- and B-Type Starch Granules in Wheat Endosperm, *Cereal Chem.* 76 (1999) 375–379.
- [39] K.K. Barlow, M.S. Buttrose, D.H. Simmonds, M. Vesk, The Nature of the Starch-Protein Interface in Wheat Endosperm, *Cereal Chem.* 50 (1973) 443–454.
- [40] N.L. Kent, *Technology of Cereals*, Pergamon Press, Oxford, 1975.
- [41] Y.Z. Li, E.S. Posner, The influence of kernel size on wheat millability, *Bull. Oper. Millers.* (1987) 5089–5094.
- [42] A. Fistes, G. Tanovic, Predicting the size and compositional distributions of wheat flour stocks following first break roller milling using the breakage matrix approach, *J. Food Eng.* 75 (2006) 527–534.
- [43] C. Fang, G.M. Campbell, Effect of Roll Fluting Disposition and Roll Gap on Breakage of Wheat Kernels During First-Break Roller Milling, *Cereal Chem.* 79 (2002) 518–522.
- [44] D. Dziki, J. Laskowski, Wheat kernel physical properties and milling process, *Acta Agrophysica.* 6 (2005) 59–71.
- [45] D.P. Phillips, F.F. Niernberger, Wheat hardness: its genetic, structural and biochemical background, measurement and significance, in: Y. Pomeranz (Ed.), *Adv. Cereal Sci. Technol.*, American Associations of Cereal Chemist Inc., St Paul, 1990: pp. 471–547.
- [46] S.C.W. Hook, Specific Weight and Wheat Quality, *J. Sci. Food Agric.* 35 (1984) 1136–1141.
- [47] Г.А. Егоров, *Технология переработки зерна*, Колос, Москва, 1977.
- [48] K.M. Turnbull, S. Rahman, Endosperm Texture in Wheat, *J. Cereal Sci.* 36 (2002) 327–337.
- [49] Y. Haddad, F. Mabile, A. Mermet, J. Abecassis, J.C. Benet, Rheological properties of wheat endosperm with a view on grinding behaviour, *Powder Technol.* 105 (1999) 89–94.
- [50] N.L. Stenvert, K. Kingswood, The influence of the physical structure of the protein matrix on wheat hardness, *J. Sci. Food Agric.* 28 (1977) 11–19.
- [51] G. Glenn, R. Johnston, Mechanical properties of starch, protein and endosperm and their relationship to hardness in wheat, *Food Struct.* 11 (1992) 187–199.
- [52] P. Greenwell, A starch granule protein associated with endosperm softness in wheat,



- Cereal Chem. 63 (1986) 379–380.
- [53] O. Piot, J.C. Autran, M. Manfail, Investigation by confocal raman microspectroscopy of the molecular factors responsible for grain cohesion in the triticum aestivum bread wheat. Role of the cell walls in the starchy endosperm, *J. Cereal Sci.* (2001).
- [54] V. Topin, F. Radjaï, J.Y. Delenne, A. Sadoudi, F. Mabilie, Wheat endosperm as a cohesive granular material, *J. Cereal Sci.* 47 (2008) 347–356.
- [55] V. Topin, F. Radjaï, J.Y. Delenne, F. Mabilie, Mechanical modeling of wheat hardness and fragmentation, *Powder Technol.* 190 (2009) 215–220.
- [56] L. Wang, G. Jeronimidis, Investigation of the fracture mode for hard and soft wheat endosperm using the loading-unloading bending test, *J. Cereal Sci.* 48 (2008) 193–202.
- [57] D.H. Simmonds, Chemical basis of hardness and vitreosity in the wheat kernel, *Bak. Dig.* (1974).
- [58] R. Hoseneý, P. Seib, Structural differences in hard and soft wheat, *Bak. Dig.* (1973).
- [59] G. Tanović, R. Bret, Z. Đurin, Ispitivanje uzajamnog uticaja strukturnomehaničkih osobina pšenice i razmaka između valjaka na efekte I krupljenja, *Žito-Hleb.* 5 (1978) 8–23.
- [60] G. Tanović, Zavisnost efekata krupljenja od međusobnog usklađivanja žlebova valjaka i strukturno-mehaničkih osobina pšenice, Novi Sad, 1980.
- [61] G. Tanović, Z. Đurin, Zavisnost efekata krupljenja Novosadske rane 2 od uzajamnog položaja žlebova valjaka prvih prolazišta krupljenja, *Žito-Hleb.* 8 (1981) 3–13.
- [62] C. Fang, G.M. Campbell, Stress-strain analysis and visual observation of wheat kernel breakage during roller milling using fluted rolls, *Cereal Chem.* 79 (2002) 511–517.
- [63] C. Fang, G.M. Campbell, On predicting roller milling performance IV: Effect of roll disposition on the particle size distribution from first break milling of wheat, *J. Cereal Sci.* 37 (2003) 21–29.
- [64] G.M. Campbell, C. Fang, I.I. Muhamad, On predicting roller milling performance VI: Effect of kernel hardness and shape on the particle size distribution from First Break milling of wheat, *Food Bioprod. Process.* 85 (2007) 7–23.
- [65] V. Greffeuille, J. Abecassis, N. Barouh, P. Villeneuve, F. Mabilie, C. Bar L'Helgouac'h, V. Lullien-Pellerin, Analysis of the milling reduction of bread wheat farina: Physical and biochemical characterisation, *J. Cereal Sci.* 45 (2007) 97–105.
- [66] H. Zwingelberg, Untersuchungen über den Energieaufwand in Mühlenbetrieben, *Getreide Mehl Und Brot.* 34 (1980) 57–60.
- [67] R.H. Kilborn, H.C. Black, J.E. Dexter, D.G. Martin, Energy consumption during flour milling: Description of two measuring systems and the influence of wheat hardness on energy requirements, *Cereal Chem.* (1982) 284–288.
- [68] L.K. Berghofer, A.D. Hocking, D. Miskelly, E. Jansson, Microbiology of wheat and flour milling in Australia, *Int. J. Food Microbiol.* 85 (2003) 137–149.

- [69] G. Tanović, Prilog proučavanju parametara usitnjavanja pri krupljenju domaće pšenice, Novi Sad, 1986.
- [70] B.G. Sudgen, T.D., Osborne, Wheat flour milling, in: D.A.V. Dendy, B.J. Dobraszczyk (Eds.), Cereal. Cereal Prod. Chem. Technol., Aspen Publishers., New York, 2001: pp. 140–181.
- [71] W.G. Owens, Wheat, corn and coarse grains milling, in: W.G. Owens (Ed.), Cereal. Process. Technol., Woodhead Publishing Ltd., Cambridge, 2001: pp. 27–52.
- [72] И.Т. Мерко, Совершенствование технологических процессов сортового помола пшеницы, Колос, Москва, 1979.
- [73] G.M. Campbell, C. Webb, On predicting roller millng performance Part I: the breakage equation, Powder Technol. 115 (2001) 234–242.
- [74] A. Fistes, D. Rakić, A. Takači, M. Brdar, The Breakage Matrix Approach as a Tool for Describing the Milling Process – Theory, Application, Possibilities and Limitations, Chapter 3, in: M. Ramirez (Ed.), Milling Fundam. Process. Technol., Nova Science Publishers, New York, 2015: pp. 51–70.
- [75] F.H. Hsieh, D.G. Martin, H.C. Black, K.H. Tipples, Some Factors Affecting the First Break of Canadian Wheat, Cereal Chem. 57 (1980) 217–223.
- [76] G. Tanović, Z. Đurin, Zavisnost efekata krupljenja pšenice od uzajamnog položaja žlebova valjaka prvih prolazišta krupljenja, Žito-Hleb. 9 (1982) 11–19.
- [77] G. Tanović, M. Jovičić, Ispitivanje uticaja razmaka između valjaka na učinak mlevenja okrajaka, Žito-Hleb. 15 (1988) 61–68.
- [78] M.G. Scanlon, J.E. Dexter, C.G. Biiliaders, Particle-size related physical properties of flour produced by smooth roll reduction of hard red spring wheat farina, Cereal Chem. 65 (1988) 486–492.
- [79] R.H. Perry, C.H. Chilton, Chemical Engineers Handbook, 5th ed., McGraw Hill, New York, 1973.
- [80] F. Schumacher, Technical aspects of grinding with roller mills, Assoc. Oper. Millers-Bulletin. (1967) 2956–2957.
- [81] J. Куприц, Технология переработки зерна, Колос, Москва, 1965.
- [82] M.G. Scanlon, J.E. Dexter, Effect of Smooth Roll Grinding Conditions on Reduction of Hard Red Spring Wheat Farina, Cereal Chem. 63 (1986) 431–435.
- [83] И.Т. Мерко, Технология мукомольного и крупяного производства, Агропромиздат, Москва, 1985.
- [84] И.А. Наумов, И.Н. Маслов, Влияние окружной скорости вращения валков на измельчение зерна и расход энергии, Мукомольно-Элеваторная Промышленность. 1 (1964).
- [85] Л.Е. Айзикович, Физико-химические основы технологии производства муки, Колос, Москва, 1975.

- [86] A. Fistes, G. Tanovic, Effect of Smooth Roll Grinding Conditions on Reduction of Sizings in the Wheat Flour Milling Process, in: V. Pletney (Ed.), Focus Food Eng. Res. Dev., 2007: pp. 453–466.
- [87] H. Wanzenried, Grinding with smooth Rolls, Association of Operative Millers– Bulletin (September), 1970.
- [88] H. Zwingelberg, D. Meyer, P. Gerstenkorn, Beeinflussung der Mehlausbeute und Mehlqualität von Weizen durch Glattwalzen unterschiedlicher Beschaffenheit, Getreide Mehl Brot. 37 (1983) 112–117.
- [89] A.D. Evers, D.J. Stevens, Production and Measurement of Starch Damage in Flour. Effect of Starch Damage on Hot Pasting Properties, Starch. 36 (1984) 309–312.
- [90] H. Creason, Grinding and corrugating rolls, Assoc. Oper. Millers – Bull. November (1975) 3569–3570.
- [91] G. Tanović, Z. Đurin, Zavisnost efekata krupljenja pšenice od uzajamnog položaja žlebova valjaka zadnjih prolazišta krupljenja, Žito-Hleb. 9 (1982) 31–37.
- [92] H. Gehle, The Miag »Vario« rollstand-design and purpose, Assoc. Oper. Millers – Bull. November (1965) 2861–2862.
- [93] H. Cleve, F. Will, Research with the help of the Varioroll, Cereal Sci. Today. 11 (1966) 128–132.
- [94] F. Schumacher, Spiral, cut, pressure among technical aspects of grinding with roller mills, Am. Mill. Process. 5 (1966) 29.
- [95] F.D. McCorkle, Development and operation of the modern roller mill, Assoc. Oper. Millers – Bull. May (1973) 3362–3364.
- [96] M. Fowler, Adjusting the break system, World Grain. (2014) 114–118.
- [97] M. Fowler, Optimizing mill performance, World Grain. (2011) 52–56.
- [98] E.P. Farrell, A.B. Ward, Flow rates and analysis for ash and proteins of all streams in the Kansas State University pilot flour mill, Assoc. Oper. Millers – Bull. (1965) 2842–2847.
- [99] P.N. Nelson, C.E. McDonald, Properties of wheat flour protein in flour from selected mill streams, Cereal Chem. 54 (1977) 1182–1191.
- [100] C.F. Ciacco, B.L. D’Appolonia, Characterization and gelling capacity of water-soluble pentosans isolated from deifferent mill streams, Cereal Chem. 59 (1982) 163–166.
- [101] P. Prabhasankar, P. Haridas Rao, Lipids in wheat flour streams, J. Cereal Sci. 30 (1999) 315–322.
- [102] P. Prabhasankar, M.L. Sudha, P. Haridas Rao, Quality characteristics of wheat flour milled streams, Food Res. Int. 33 (2000) 381–386.
- [103] P. Prabhasankar, M. Vijaya Kumar, B.R. Lokesh, P. Haridas Rao, Distribution of free lipids and their fractions in wheat flour milled streams, Food Chem. 71 (2000) 97–103.

- [104] K.U. Rani, U.J.S. Prasada Rao, K. Leelavathi, P. Haridas Rao, Distribution of enzymes in wheat flour mill streams, *J. Cereal Sci.* 34 (2001) 233–242.
- [105] S.A. Jensen, L. Munck, H. Martens, The botanical constituents of wheat and wheat milling fractions. I. Quantification by autofluorescence, *Cereal Chem.* 59 (1982) 477–484.
- [106] C. Antoine, S. Peyron, V. Lullien-Pellerin, J. Abecassis, X. Rouau, Wheat bran tissue fractionation using biochemical markers, *J. Cereal Sci.* 39 (2004) 387–393.
- [107] S.D. Sakhare, A.A. Inamdar, The cumulative ash curve: A best tool to evaluate complete mill performance, *J. Food Sci. Technol.* 51 (2014) 795–799.
- [108] L.G. Austin, A Review: Introduction to the Mathematical Description of Grinding as a Rate Process, *Powder Technol.* 5 (1971) 1–17.
- [109] B. Epstein, Logarithmico-Normal Distribution in Breakage of Solids, *Ind. Eng. Chem.* 40 (1948) 2289–2291.
- [110] A.N. Kolmogorov, On the Logarithmically Normal Distribution Law of Particle Sizes at the Subdivision, 1941.
- [111] K. Sedlatschek, L. Bass, Contribution to Theory of Milling Processes, *Powder Technol.* 6 (1953) 148–153.
- [112] S.R. Broadbent, T.G. Callcott, Coal breakage processes: II. A matrix representation of breakage, *J. Inst. Fuel.* 29 (1956) 524–528.
- [113] S.. Broadbent, T.G. Callcott, A matrix analysis of processes involving particle assemblies, *Philos. Trans. R. Soc. London. Ser. A, Math. Phys. Sci.* 249 (1956) 99–123.
- [114] C. Fang, G.M. Campbell, On predicting roller milling performance V: Effect of moisture content on the particle size distribution from first break milling of wheat, *J. Cereal Sci.* 37 (2003) 31–41.
- [115] E. Bilgili, B. Scarlett, Population balance modeling of non-linear effects in milling processes, *Powder Technol.* 153 (2005) 59–71.
- [116] E. Bilgili, J. Yepes, B. Scarlett, Formulation of a non-linear framework for population balance modeling of batch grinding: Beyond first-order kinetics, *Chem. Eng. Sci.* 61 (2006) 33–44.
- [117] S.L.A. Hennart, W.J. Wildeboer, P. van Hee, G.M.H. Meesters, Identification of the grinding mechanisms and their origin in a stirred ball mill using population balances, *Chem. Eng. Sci.* 64 (2009) 4123–4130.
- [118] M. Capece, Population balance modeling applied to the milling of pharmaceutical extrudate for use in scale-up, *Adv. Powder Technol.* 29 (2018) 3022–3032.
- [119] V.P.B. Esnault, H. Zhou, D. Heitzmann, New population balance model for predicting particle size evolution in compression grinding, *Miner. Eng.* 73 (2015) 7–15.
- [120] H. Lee, K. Kim, H. Lee, Analysis of grinding kinetics in a laboratory ball mill using population-balance-model and discrete-element-method, *Adv. Powder Technol.* 30

- (2019) 2517–2526.
- [121] S.R. Broadbent, T.G. Callcott, Coal breakage Processes. I A New Analysis of Coal Breakage Processes, *J. Inst. Fuel.* 29 (1956) 524–528.
- [122] S.R. Broadbent, T.G. Callcott, Coal Breakage Processes: IV. An Exploratory Analysis of the Cone Mill in Open Circuit Grinding, *J. Inst. Fuel.* 30 (1957) 18–21.
- [123] A. Fistes, D. Rakić, A. Takači, M. Brdar, Using the breakage matrix approach to define the optimal particle size distribution of the input material in a milling operation, *Chem. Eng. Sci.* 102 (2013) 346–353.
- [124] A. Fistes, D. Rakić, A. Takači, M. Brdar, Solution of the breakage matrix reverse problem, *Powder Technol.* 268 (2014) 412–419.
- [125] A. Fistes, D. Rakić, Using the eight-roller mill in the purifier-less mill flow, *J. Food Sci. Technol.* 52 (2015) 4661–4668.
- [126] G.M. Campbell, C. Sharp, K. Wall, F. Mateos-Salvador, S. Gubatz, A. Huttly, P. Shewry, Modelling wheat breakage during roller milling using the Double Normalised Kumaraswamy Breakage Function: Effects of kernel shape and hardness, *J. Cereal Sci.* 55 (2012) 415–425.
- [127] S.P. Galindez-Najera, G.M. Campbell, Modeling first break milling of debranned wheat using the double normalized Kumaraswamy breakage function, *Cereal Chem.* 91 (2014) 533–541.
- [128] J. Yuan, R.A. Flores, D. Eustace, G.A. Milliken, A systematic analysis of the break subsystems of a wheat flour pilot mill, *Food Bioprod. Process. Trans. Inst. Chem. Eng. Part C.* 81 (2003) 170–179.
- [129] H.W.H. Al-Mogahwi, C.G.J. Baker, Performance evaluation of mills and separators in a commercial flour mill, *Food Bioprod. Process.* 83 (2005) 25–35.
- [130] F. Mateos-Salvador, J. Sadhukhan, G.M. Campbell, The normalised Kumaraswamy breakage function: A simple model for wheat roller milling, *Powder Technol.* 208 (2011) 144–157.
- [131] F. Mateos-Salvador, J. Sadhukhan, G.M. Campbell, Extending the Normalised Kumaraswamy Breakage Function for roller milling of wheat flour stocks to Second Break, *Powder Technol.* 237 (2013) 107–116.
- [132] K.F. Fuh, J.M. Coate, G.M. Campbell, Effects of roll gap, kernel shape, and moisture on wheat breakage modeled using the double normalized kumaraswamy breakage function, *Cereal Chem.* 91 (2014) 8–17.
- [133] F. Lyu, M. Thomas, W.H. Hendriks, A.F.B. van der Poel, Size reduction in feed technology and methods for determining, expressing and predicting particle size: A review, *Anim. Feed Sci. Technol.* 261 (2020) 114347.
- [134] A. Fišteš, G. Tanović, B. Gordić, Predviđanje efekata usitnjavanja pšenice metodom matričnih jednačina, *Žito-Hleb.* 31 (2004) 203–213.
- [135] A. Fišteš, Predviđanje efekata usitnjavanja pšenice primenom matričnih jednačina,

Univerzitet u Novom Sadu, 2005.

- [136] S.P. Galindez-Najera, P. Choomjaihan, C. Barron, V. Lullien-Pellerin, G.M. Campbell, A compositional breakage equation for wheat milling, *J. Food Eng.* 182 (2016) 46–64.
- [137] K. Yoneda, A parallel to the least squares for positive inverse problems, *J. Oper. Res.* 49 (2006) 279–289.
- [138] D. Bas, I.H. Boyaci, Modeling and optimization I: Usability of response surface methodology, *J. Food Eng.* 78 (2007) 836–845.
- [139] A.I. Khuri, S. Mukhopadhyay, Response surface methodology, *Wiley Interdiscip. Rev. Comput. Stat.* 2 (2010) 128–149.
- [140] R.H. Myers, D.C. Montgomery, C.M. Anderson-Cook, Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments, 4th ed., John Wiley & Sons, New York, 2016.
- [141] D.C. Montgomery, Design and Analysis of Experiments, John Wiley & Sons, New York, 2001.
- [142] M.A. Bezerra, R.E. Santelli, E.P. Oliveira, L.S. Villar, L.A. Escaleira, Response surface methodology (RSM) as a tool for optimization in analytical chemistry, *Talanta* 76 (2008) 965–977.
- [143] M. Yolmeh, S.M. Jafari, Applications of Response Surface Methodology in the Food Industry Processes, *Food Bioprocess Technol.* 10 (2017) 413–433.
- [144] S. Raissi, R.E. Farsani, Statistical process optimization Through multi-response surface methodology, *World Acad. Sci. Eng. Technol.* 39 (2009) 280–284.
- [145] A.Y. Aydar, Utilization of Response Surface Methodology in Optimization of Extraction of Plant Materials, in: *Stat. Approaches With Emphas. Des. Exp. Appl. to Chem. Process.*, 2018: pp. 157–169.
- [146] A.I. Khuri, Response Surface Methodology and Its Applications In Agricultural and Food Sciences, *Biometrics Biostat. Int. J.* 5 (2017) 155–163.
- [147] F. Riswanto, A. Rohman, S. Pramono, S. Martono, Application of response surface methodology as mathematical and statistical tools in natural product research, *J Appl Pharm Sci.* 9 (2019) 125–133.
- [148] A.T. Nair, A.R. Makwana, M.M. Ahammed, The use of response surface methodology for modelling and analysis of water and wastewater treatment processes: A review, *Water Sci. Technol.* 69 (2014) 464–478.
- [149] M.J.K. Bashir, S.S. Abu Amr, S.Q. Aziz, N.C. Aun, S. Sethupathi, Wastewater Treatment Processes Optimization Using Response Surface Methodology (RSM) Compared with Conventional Methods : Review and Comparative Study, *Middle-East J. Sci. Res.* 23 (2015) 244–252.
- [150] A.B. Jasni, H. Kamyab, S. Chelliapan, N. Arumugam, S. Krishnan, M.F.M. Din, Treatment of wastewater using response surface methodology: A brief review, *Chem. Eng. Trans.* 78 (2020) 535–540.

- [151] M. Pojić, D. Rakić, Ž. Lazić, Chemometric optimization of the robustness of the near infrared spectroscopic method in wheat quality control, *Talanta*. 131 (2015) 236–242.
- [152] J. Wang, B. Sun, Y. Cao, Y. Tian, X. Li, Optimisation of ultrasound-assisted extraction of phenolic compounds from wheat bran, *Food Chem.* 106 (2008) 804–810.
- [153] J. Petrović, D. Rakić, A. Fišteš, B. Pajin, I. Lončarević, V. Tomović, D. Zarić, Defatted wheat germ application: Influence on cookies' properties with regard to its particle size and dough moisture content, *Food Sci. Technol. Int.* 23 (2017) 597–607.
- [154] N. Teslić, N. Bojanić, D. Rakić, A. Takači, Z. Zeković, A. Fišteš, M. Bodroža-Solarov, B. Pavlić, Defatted wheat germ as source of polyphenols—Optimization of microwave-assisted extraction by RSM and ANN approach, *Chem. Eng. Process. - Process Intensif.* 143 (2019).
- [155] S.K. Ghodke, L. Ananthanarayan, L. Rodrigues, Use of response surface methodology to investigate the effects of milling conditions on damaged starch, dough stickiness and chapatti quality, *Food Chem.* 112 (2009) 1010–1015.
- [156] J. Yoo, B.P. Lamsal, E. Haque, J.M. Faubion, Effect of enzymatic tempering of wheat kernels on milling and baking performance, *Cereal Chem.* 86 (2009) 122–126.
- [157] S. Lijuan, Z. Guiying, Z. Guoan, L. Zaigui, Effects of different milling methods on flour quality and performance in steamed breadmaking, *J. Cereal Sci.* 45 (2007) 18–23.
- [158] A. Fišteš, D. Rakić, Interaction effects of milling variables on energy consumption of stirred ball mill for chocolate refining, *J. Process. Energy Agric.* 19 (2015) 197–201.
- [159] A. Fišteš, D. Rakić, Đ. Vukmirović, N. Bojanić, The possibilities of wheat roller milling optimization using the response surface methodology, *J. Process. Energy Agric.* 21 (2017) 118–123.
- [160] Q. Fang, G. Biby, E. Haque, M.A. Hanna, C.K. Spillman, Neural network modeling of physical properties of ground wheat, *Cereal Chem.* 75 (1998) 251–253.
- [161] Q. Fang, M.A. Hanna, E. Haque, C.K. Spillman, Neural network modeling of energy requirements for size reduction of wheat, *Trans. ASAE.* 43 (2000) 947–952.
- [162] K. Sabanci, N. Aydin, A. Sayaslan, M.E. Sonmez, M.F. Aslan, L. Demir, C. Sermet, Wheat Flour Milling Yield Estimation Based on Wheat Kernel Physical Properties Using Artificial Neural Networks, *Int. J. Intell. Syst. Appl. Eng.* 8 (2020) 78–83.
- [163] A. Fišteš, D. Simovic-Soronja, I. Nikolić, Estimating the Relative Efficiency of Separation Between Endosperm and Bran in the Wheat Flour Milling Process, (2011) 66–71.
- [164] A. Fistes, D. Rakic, A. Takaci, The function for estimating the separation efficiency of the wheat flour milling process, *J. Food Sci. Technol.* 50 (2013) 609–614.
- [165] A. Patwa, R.P.K. Ambrose, M.E. Casada, Discrete element method as an approach to model the wheat milling process, *Powder Technol.* 302 (2016) 350–356.
- [166] F. Dal-Pastro, P. Facco, F. Bezzo, E. Zamprogna, M. Barolo, Data-driven modeling of milling and sieving operations in a wheat milling process, *Food Bioprod. Process.* 99

(2016) 99–108.

- [167] F. Dal-Pastro, P. Facco, E. Zamproga, F. Bezzo, M. Barolo, Model-based approach to the design and scale-up of wheat milling operations — Proof of concept, *Food Bioprod. Process.* 106 (2017) 127–136.
- [168] Pravilnik o metodama fizičkih i hemijskih analiza za kontrolu kvaliteta žita, mlinskih i pekarskih proizvoda, testenina i brzo smrznutih testa, *Službeni list SFRJ*, 1988.
- [169] G. Kaluđerski, N. Filipović, Metode ispitivanja kvaliteta žita, brašna i gotovih proizvoda, Tehnološki fakultet, Novi Sad, 1998.
- [170] International Association for Cereal Science and Technology, ICC Standard Methods, Standard Method No. 110/1: Determination of Moisture Content of Cereals and Cereal Products (Practical Method), (1976).
- [171] International Association for Cereal Science and Technology, ICC Standard Methods, Standard Method No. 104/1: Determination of ash in cereals and cereal products, (1990).
- [172] M. Anderson, P. Whitcomb, DoE simplified: practical tools for effective experimentation, Productivity Press, New York, 2007.
- [173] A. Fistes, G. Tanovic, J. Mastilovic, Using the eight-roller mill on the front passages of the reduction system, *J. Food Eng.* 85 (2008) 296–302.
- [174] M.G. Scanlon, J.E. Dexter, C.G. Biliaderis, Particle-Size Related Physical Properties of Flour Produced by Smooth Roll Reduction of Hard Red Spring Wheat Farina, *Cereal Chem.* 65 (1988) 486–492.



*Ovaj Obrazac čini sastavni deo doktorske disertacije, odnosno dokorskog umetničkog projekta koji se brani na Univerzitetu u Novom Sadu. Popunjen Obrazac ukoričiti iza teksta doktorske disertacije, odnosno dokorskog umetničkog projekta.*

## Plan tretmana podataka

<b>Naziv projekta/istraživanja</b>
Primena reverzibilnosti matrica usitnjavanja i metode odzivne površine za kontrolu efekata usitnjavanja u tehnološkom postupku mlevenja pšenice
<b>Naziv institucije/institucija u okviru kojih se sprovodi istraživanje</b>
Tehnološki fakultet, Univerzitet u Novom Sadu
<b>Naziv programa u okviru kog se realizuje istraživanje</b>
Istraživanja u okviru ove doktorske disertacije su povezana sa istraživanjima koja finansira Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije, u okviru projekta „Razvoj novih funkcionalnih konditorskih proizvoda na bazi uljarica, broj: TR 31014.
<b>1. Opis podataka</b>
<p>1.1 Vrsta studije</p> <p><i>Ukratko opisati tip studije u okviru koje se podaci prikupljaju</i>  <u>Doktorska disertacija</u></p> <p>1.2 Vrste podataka  <b>a)</b> kvantitativni  <b>b)</b> kvalitativni</p> <p>1.3. Način prikupljanja podataka  a) ankete, upitnici, testovi  b) kliničke procene, medicinski zapisi, elektronski zdravstveni zapisi  v) genotipovi: navesti vrstu _____  g) administrativni podaci: navesti vrstu _____  d) uzorci tkiva: navesti vrstu _____  đ) snimci, fotografije: navesti vrstu _____  e) tekst, navesti vrstu <u>naučna literatura</u>  ž) mapa, navesti vrstu _____  z) ostalo: opisati <u>kroz eksperimentalni rad</u></p> <p>1.3 Format podataka, upotrebljene skale, količina podataka</p> <p>1.3.1 Upotrebljeni softver i format datoteke:  a) Excel fajl, datoteka <u>.xlsx</u>  b) SPSS fajl, datoteka _____  c) PDF fajl, datoteka <u>.pdf</u>  d) Tekst fajl, datoteka <u>.docx</u>  e) JPG fajl, datoteka <u>.jpg, .png</u>  f) Ostalo, datoteka _____</p> <p>1.3.2. Broj zapisa (kod kvantitativnih podataka)</p>

- a) broj varijabli veliki broj  
b) broj merenja (ispitanika, procena, snimaka i sl.) veliki broj

### 1.3.3. Ponovljena merenja

- a)** da  
b) ne

Ukoliko je odgovor da, odgovoriti na sledeća pitanja:

- a) vremenski razmak između ponovljenih mera je jedan čas  
b) varijable koje se više puta mere odnose se na parametre usitnjavanja mlevenja griza  
v) nove verzije fajlova koji sadrže ponovljena merenja su imenovane kao odgovarajući redni brojevi eksperimenta

Napomene: \_\_\_\_\_

*Da li formati i softver omogućavaju deljenje i dugoročnu validnost podataka?*

- a)** Da  
b) Ne

*Ako je odgovor ne, obrazložiti* \_\_\_\_\_

## 2. Prikupljanje podataka

### 2.1 Metodologija za prikupljanje/generisanje podataka

2.1.1. U okviru kog istraživačkog nacrta su podaci prikupljeni?

- a) eksperiment, navesti tip mlevenje pšenice i griza, prosejavanje mliva, analitika  
b) korelaciono istraživanje, navesti tip response surface methodology (RSM)  
c) analiza teksta, navesti tip tumačenje eksperimentalno dobijenih rezultata, izvođenje zaključaka i poređenje sa literaturnim podacima  
d) ostalo, navesti šta \_\_\_\_\_

*2.1.2 Navesti vrste mernih instrumenata ili standarde podataka specifičnih za određenu naučnu disciplinu (ako postoje).*

- Laboratorijsko sito Sortimat (Pertin AB, Hagersten, Sweden)
- Laboratorijsko sito – model MLU-300, Bühler
- Laboratorijska valjna stolica – Variostühl C Ex 2 (Miag, Braunschweig, Germany)
- International Association for Cereal Science and Technology, ICC Standard Methods, Standard Method No. 110/1: Determination of Moisture Content of Cereals and Cereal Products (Practical Method), (1976)
- International Association for Cereal Science and Technology, ICC Standard Methods, Standard Method No. 104/1: Determination of ash in cereals and cereal products, (1990).

### 2.2 Kvalitet podataka i standardi

2.2.1. Tretman nedostajućih podataka

- a) Da li matrica sadrži nedostajuće podatke? Da **Ne**

Ako je odgovor da, odgovoriti na sledeća pitanja:

- a) Koliki je broj nedostajućih podataka? \_\_\_\_\_  
b) Da li se korisniku matrice preporučuje zamena nedostajućih podataka? Da Ne  
v) Ako je odgovor da, navesti sugestije za tretman zamene nedostajućih podataka

2.2.2. Na koji način je kontrolisan kvalitet podataka? Opisati  
Kvalitet podataka je kontrolisan primenom dobre laboratorijske prakse.

2.2.3. Na koji način je izvršena kontrola unosa podataka u matricu?  
Unos podataka u matricu proveren je od strane strane svih učesnika u istraživanjima

### 3. Tretman podataka i prateća dokumentacija

#### 3.1. Tretman i čuvanje podataka

3.1.1. Podaci će biti deponovani u Repozitorijum doktorskih disertacija na Univerzitetu u Novom Sadu.

3.1.2. URL adresa https://www.cris.uns.ac.rs/searchDissertations.jsf

3.1.3. DOI \_\_\_\_\_

3.1.4. Da li će podaci biti u otvorenom pristupu?

a) Da

b) Da, ali posle embarga koji će trajati do \_\_\_\_\_

v) Ne

Ako je odgovor ne, navesti razlog \_\_\_\_\_

3.1.5. Podaci neće biti deponovani u repozitorijum, ali će biti čuvani.

Obrazloženje

---

---

#### 3.2 Metapodaci i dokumentacija podataka

3.2.1. Koji standard za metapodatke će biti primenjen? \_\_\_\_\_

3.2.1. Navesti metapodatke na osnovu kojih su podaci deponovani u repozitorijum.

---

---

Ako je potrebno, navesti metode koje se koriste za preuzimanje podataka, analitičke i proceduralne informacije, njihovo kodiranje, detaljne opise varijabli, zapisa itd.

---

---

#### 3.3 Strategija i standardi za čuvanje podataka

3.3.1. Do kog perioda će podaci biti čuvani u repozitorijumu? \_\_\_\_\_

3.3.2. Da li će podaci biti deponovani pod šifrom? Da Ne

3.3.3. Da li će šifra biti dostupna određenom krugu istraživača? Da Ne

3.3.4. Da li se podaci moraju ukloniti iz otvorenog pristupa posle izvesnog vremena?

Da Ne

Obrazložiti

---

#### 4. Bezbednost podataka i zaštita poverljivih informacija

Ovaj odeljak MORA biti popunjen ako vaši podaci uključuju lične podatke koji se odnose na učesnike u istraživanju. Za druga istraživanja treba takođe razmotriti zaštitu i sigurnost podataka.

##### 4.1 Formalni standardi za sigurnost informacija/podataka

Istraživači koji sprovode ispitivanja s ljudima moraju da se pridržavaju Zakona o zaštiti podataka o ličnosti ([https://www.paragraf.rs/propisi/zakon\\_o\\_zastiti\\_podataka\\_o\\_licnosti.html](https://www.paragraf.rs/propisi/zakon_o_zastiti_podataka_o_licnosti.html)) i odgovarajućeg institucionalnog kodeksa o akademskom integritetu.

##### 4.1.2. Da li je istraživanje odobreno od strane etičke komisije? Da Ne

Ako je odgovor Da, navesti datum i naziv etičke komisije koja je odobrila istraživanje

---

##### 4.1.2. Da li podaci uključuju lične podatke učesnika u istraživanju? Da Ne

Ako je odgovor da, navedite na koji način ste osigurali poverljivost i sigurnost informacija vezanih za ispitanike:

- a) Podaci nisu u otvorenom pristupu
  - b) Podaci su anonimizirani
  - c) Ostalo, navesti šta
- 

#### 5. Dostupnost podataka

##### 5.1. Podaci će biti

a) javno dostupni

b) dostupni samo uskom krugu istraživača u određenoj naučnoj oblasti

c) zatvoreni

*Ako su podaci dostupni samo uskom krugu istraživača, navesti pod kojim uslovima mogu da ih koriste:*

---

*Ako su podaci dostupni samo uskom krugu istraživača, navesti na koji način mogu pristupiti podacima:*

---

##### 5.4. Navesti licencu pod kojom će prikupljeni podaci biti arhivirani.

---

#### 6. Uloge i odgovornost

##### 6.1. Navesti ime i prezime i mejl adresu vlasnika (autora) podataka

---

##### 6.2. Navesti ime i prezime i mejl adresu osobe koja održava matricu s podacima

---

##### 6.3. Navesti ime i prezime i mejl adresu osobe koja omogućuje pristup podacima drugim istraživačima

---

Nemanja Bojanić, [bojanic21@uns.ac.rs](mailto:bojanic21@uns.ac.rs)