



UNIVERZITET U NOVOM SADU
Tehnološki fakultet

**OPTIMIZACIJA PROCESA MEŠANJA HRANE
ZA ŽIVOTINJE U VERTIKALNIM I
CILINDRIČNIM MEŠALICAMA**

DOKTORSKA DISERTACIJA

Mentor: Prof. dr Ljubinko Lević

Kandidat: mr Olivera Đuragić

Novi Sad, 2011 godine

**UNIVERZITET U NOVOM SADU
TEHNOLOŠKI FAKULTET**

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

Redni broj: RBR	
Identifikacioni broj: IBR	
Tip dokumentacije: TD	Monografska dokumentacija
Tip zapisa: TZ	Tekstualni štampani materijal
Vrsta rada (dipl., mag., dokt.): VR	Doktorska disertacija
Ime i prezime autora: AU	Mr Olivera M. Đuragić, dipl.inž.
Mentor (titula, ime, prezime, zvanje): MN	Prof. dr Ljubinko Lević, redovni profesor
Naslov rada: NR	OPTIMIZACIJA PROCESA MEŠANJA HRANE ZA ŽIVOTINJE U VERTIKALNIM I CILINDRIČNIM MEŠALICAMA
Jezik publikacije: JP	srpski, latinica
Jezik izvoda: JI	srp. / eng.
Zemlja publikovanja: ZP	Republika Srbija
Uže geografsko područje: UGP	AP Vojvodina
Godina: GO	2011
Izdavač: IZ	autorski reprint
Mesto i adresa: MA	Bulevar cara Lazara 1, Novi Sad

Fizički opis rada: FO	6 poglavlja, 120 strana, 32 tabele, 55 slika, 131 literaturni navod
Naučna oblast: NO	Biotehničke nauke
Naučna disciplina: ND	Tehnologija hrane za životinje
Predmetna odrednica, ključne reči: PO	hrana za životinje, vertikalne mešalice, Markovljev niz, cilindrične mešalice, optimizacija, vreme mešanja
UDK	
Čuva se: ČU	Biblioteka Tehnološkog fakulteta
Važna napomena: VN	
Izvod: IZ	<p>Izmenama u konstrukciji vertikalne mešalice zamenom originalne obloge pužnice sa oblogama koje su imale 13,5%, 27% i 40% perforacija je poboljšan proces mešanja. Ova poboljšanja se ogledaju u skraćenju vremena mešanja 15%, 30% i 50% u odnosu na originalnu konstrukciju, smanjenju utroška rada i energije i otvaranja mogućnosti vraćanja ove vrste mešalica u masovniju upotrebu, jer su troškovi kupovine i održavanja ove vrste mešalica daleko niži u odnosu na druge. Izrađen je model sistem za cilindričnu mešalicu, na bazi primene teorije Markovljevog niza, kao pogodan način za predviđanje procesa mešanja u ovoj vrsti mešalica, čak i u industrijskim uslovima. Dobijeni rezultati su pokazali slaganje sa eksperimentalno dobijenim rezultatima, pri čemu je utvrđeno vreme neophodno za postizanje homogenosti u cilindričnoj mešalici iznosilo 5 minuta za odnos mešanja 1:10.000, dok za odnos mešanja 1:100.000 i vreme od 5 minuta, homogenost nije postignuta. Poređenjem rezultata programa za analizu slike, koji je prethodno razvijen u okviru metode Microtracer-a, sa ručno dobijenim rezultatima, utvrđen je visok stepen korelacije ($R=0.995$, 0.979 i 0.987) i ovaj program je ocenjen kao značajno poboljšanje i skraćenje vremena potrebnog za dobijanje rezultata.</p>
Datum prihvatanja teme od strane NN veća: DP	30.11.2006.
Datum odbrane: DO	

<p>Članovi komisije: (ime i prezime / titula / zvanje / naziv organizacije / status) KO</p>	<p>predsednik: Prof. dr Natalija Džinić, vanredni profesor, Tehnološki fakultet, Novi Sad</p> <p>član: Prof dr Vidica Stanačev, redovni profesor, Poljoprivredni fakultet, Novi Sad</p> <p>član: prof. dr Ljubinko Lević, redovni profesor, Tehnološki fakultet, Novi Sad – mentor rada</p> <p>član: dr Jovanka Lević, viši naučni saradnik, Institut za prehrambene tehnologije, Novi Sad</p>
---	--

**UNIVERSITY OF NOVI SAD
FACULTY OF TECHNOLOGY**

KEY WORD DOCUMENTATION

Accession number: ANO	
Identification number: INO	
Document type: DT	Monograph documentation
Type of record: TR	Textual printed material
Contents code: CC	Doctoral thesis
Author: AU	Olivera M. Đuragić, MSc
Mentor: MN	Prof. Ljubinko Lević, PhD, Full professor
Title: TI	Optimization of feed mixing process in the vertical and hoop mixer
Language of text: LT	Serbian, latin
Language of abstract: LA	eng. / srp.
Country of publication: CP	Republic of Serbia
Locality of publication: LP	AP Vojvodina
Publication year: PY	2011
Publisher: PU	Author's reprint
Publication place: PP	Novi Sad, Bulevar cara Lazara 1
Physical description: PD	6 chapters, 120 pages, 32 tables, 55 pictures, 131 references
Scientific field SF	Biotechnical sciences
Scientific discipline SD	Feed technology
Subject, Key words SKW	feed, vertical mixer, Markov chain, hoop mixer, optimization, mixing time
UC	

Holding data: HD	
Note: N	
Abstract: AB	<p>Changes in the construction of vertical mixers by replacement of the original screw barrel with barrel which had 13.5%, 27% and 40% perforation generally have improved process of mixing. These improvements are reflected in shortening the mixing time of 15%, 30% and 50% comparing to the original construction, reduction of labor and energy and create the possibility of returning these types of mixers in the more common, as the cost of purchasing and maintaining these types of mixers is far lower compared to others. A model system for the cylindrical mixer, based on the theory of Markov chain, as a convenient way to predict the mixing process in this type of mixer, even in industrial conditions. The results show agreement with experimental results, with a determined time necessary to achieve homogeneity in a cylindrical mixer was 5 minutes for mixing ratio 1:10,000, and more than 5 minutes for the mixing ratio 1:100,000. Comparing the results of program for image analysis, which was previously developed under a Microtracers methods with manually obtained results revealed a high degree of correlation (R = 0.995, 0.979 and 0.987) and this program was rated as significantly improving and shortening the time needed to obtain results</p>
Accepted on Scientific Board on: AS	30.11.2006.
Defended: DE	
Thesis Defend Board: DB	<p>president: Prof dr Natalija Džinić, associate professor, Faculty of Technology, Novi Sad</p> <p>member: Prof dr Vidica Stanaćev, full professor, Faculty of Agriculture, Novi Sad</p> <p>member: Prof. dr Ljubinko Lević, full professor, Faculty of Technology, Novi Sad</p> <p>member: dr Jovanka Lević, senior research assistant, Institute of Food Technology, Novi Sad</p>

SADRŽAJ

1.	UVOD.....	1
2.	PREGLED LITERATURE.....	4
2.1	Mešanje.....	4
2.2	Mehanizmi mešanja.....	8
2.3	Faktori koji utiču na mešanje.....	10
2.3.1	Veličina čestica.....	10
2.3.2	Protočnost materijala.....	12
2.4	Klasifikacija sistema praškastih materijala.....	16
2.5	Vrste mešalica i konstrukcija.....	17
2.5.1	Vertikalne mešalice.....	21
2.5.2	Cilindrične mešalice.....	23
2.6	Primena matematičkog modela u predviđanju procesa mešanja.....	24
2.6.1	Pregled literature u oblasti matematičkog modelovanja mešanja.....	30
2.7	Određivanje homogenosti preko obeleživača analizom slike.....	31
3.	MATERIJAL I METODE.....	34
3.1	Vertikalna mešalica.....	34
3.1.1	Proračun za obloge pužnice.....	36
3.2	Cilindrična mešalica.....	38
3.3	Hipoteza za Markovljev niz.....	39
3.4	Prikaz matrice za proces mešanja u cilindričnoj mešalici.....	43
3.5	Metoda za određivanje homogenosti sa Microtracer-ima.....	44
3.6	Ispitivanje programa za brojanje tačica Microtracer-a.....	46
4.	REZULTATI I DISKUSIJA.....	48
4.1	Rezultati ispitivanja nosača (samlevenog kukuruza) upotrebljenog za testove u vertikalnoj mešalici.....	48
4.1.1	Sadržaj vode.....	48
4.1.2	Granulacija i protočne karakteristike kukuruza.....	48

4.2	Rezultati ispitivanja homogenosti kod originalne konstrukcije mešalice.....	52
4.2.1	Rezultati za odnos mešanja 1:10.000.....	52
4.2.2	Rezultati za odnos mešanja 1:100.000.....	54
4.3	Rezultati ispitivanja homogenosti kod obloge sa 13.5 % perforacija.....	57
4.4	Rezultati ispitivanja homogenosti kod obloge sa 27 % perforacija.....	60
4.5	Rezultati ispitivanja homogenosti kod obloge sa 40 % perforacija.....	63
4.6	Sumarni rezultati.....	66
4.7	Rezultati ispitivanja nosača (kukuruznog brašna) upotrebljenog za testove u cilindričnoj mešalici.....	70
4.8	Rezultati ispitivanja cilindrične mešalice.....	74
4.8.1	Model kretanja čestica u mešalici.....	74
4.8.2	Rezultati ispitivanja kod različitog nivoa napunjenosti mešalice.....	83
4.8.3	Rezultati dobijeni za industrijsku mešalicu.....	91
4.9	Rezultati ispitivanja programa za brojanje tačkica.....	95
5.	ZAKLJUČCI.....	102
6.	LITERATURA.....	105

1. Uvod

Mešanje praškastih materijala, čestica, flekica, vlakana, granula dobija sve veći ekonomski značaj u različitim tehnologijama, od industrije mešanja hrane za ljude i hrane za životinje, preko farmaceutskih proizvoda, deterdženata, hemikalija, plastičnih masa, itd. U većini slučajeva, mešanje značajno utiče na kvalitet proizvoda i može se posmatrati kao ključni proces. Mešanjem može nastati nov ili poluproizvod koji će se kasnije koristiti u procesu. Kvalitet i cena ovog proizvoda, često će zavisiti od efikasnosti mešanja ali i dizajn opreme i parametri samog procesa mešanja proizvoda imaju snažan uticaj na krajnji kvalitet. Ne treba zanemariti ni ostale operacije kao što su doziranje, prosejavanje, merenje, transport i sl., koji takođe određuju kvalitet proizvoda.

Termin mešanje se primenjuje na sve one operacije koje imaju tendenciju da smanje neuniformnost u sastavu, svojstvu ili temperaturi materijala u rasutom stanju.

Tehnički, proces mešanja u industriji hrane za životinje, zadovoljava mnoštvo opreme dostupne na tržištu. Međutim, proces mešanja nije uvek dizajniran sa odgovarajućom pažnjom. To izaziva značajan finansijski gubitak koji može nastati na dva načina:

1. Kvalitet smeše je loš – ovaj parametar se odmah opaža prilikom kontrole kvaliteta proizvoda. Međutim, mešanje je često samo jedna od faza obrade i ovde su efekti nezadovoljavajućeg mešanje manje uočljivi.
2. Homogenost je zadovoljavajuća ali je previše energije utrošene za njeno postizanje.

Kao rezultat dugog mešanja, može doći do segregacije komponenti ukoliko one nisu ujednačenih fizičkih karakteristika. Ukoliko se mešaju veoma osetljive komponente, dugo vreme mešanja može da dovede do njihovog deformisanja. Ako postupak mešanja nije optimalno konfigurisan, mnogi delovi opreme u tehnološkom procesu mogu se koristiti i više nego što bi bilo neophodno što dovodi do habanja opreme i povećava troškove proizvodnje.

U postupku analize mešanja, potrebno je odgovoriti na sledeća pitanja:

- Da li je i za koje vreme, postignuta zadovoljavajuća uniformnost smeše (homogenost)?
- Da li je tip i kapacitet mešalice u skladu sa zahtevima koje je potrebno postići?
- Da li je proces mešanja ekonomičan, odnosno da li je utrošak energije minimalan za postavljene uslove i zahteve?

U našem okruženju, problemi vezani za optimizaciju procesa mešanja se uglavnom rešavaju u direktnoj proizvodnji, zamenom dotrajale opreme i kupovinom nove opreme renomiranih proizvođača, što predstavlja značajne investicije. Veoma malo pažnje se posvećuje mogućnostima poboljšanja već postojeće opreme, naročito domaćih proizvođača, kako bi se jeftina i dostupna oprema učinila efikasnijom i produktivnijom. Vertikalne mešalice koje se koriste u proizvodnji hrane za životinje su jeftine, jednostavne za upotrebu, ne zahtevaju dodatnu opremu (prijemni koševi, aspiracioni sistem prilikom pražnjenja, automatsko upravljanje) i imaju mali utrošak energije. Međutim, vertikalne mešalice su poslednjih godina zbog produženog vremena mešanja potisnute sve širom lepezom horizontalnih, veoma brzih mešalica, koje su na žalost, zbog visoke cene, dostupne samo velikim proizvođačima.

Sa druge strane, istraživanja u problematici mešanja sa različitim materijalima i uslovima za dostizanje potrebnog kvaliteta putem neposrednog empirijskog rada su dug i skup postupak. Zato poslednjih nekoliko godina značaj matematičkih modela raste. Ne treba zanemariti ni dimenzionu analizu koja omogućava da se dobiju informacije o obliku zavisnosti između veličina u fizičkim sistemima u kojima zbog složenosti, nisu moguća matematička rešenja. Zahvaljujući teoriji sličnosti, pretpostavlja se da je na osnovu eksperimentalnog istraživanja moguće utvrditi vezu između fizičkih parametara bitnih za neku pojavu. Tada je, primenjujući osnovni (malo uprošćen) stav teorije sličnosti, da su dva sistema slična ukoliko se pojava u njima odvija istim intenzitetom, moguće, na osnovu malog laboratorijskog uređaja na kojem je pojava ispitana, konstruisati daleko veći industrijski uređaj.

Modeli mogu drastično smanjiti empirijski rad neophodan za predviđanje parametara mešanja. Ovaj zaključak proizilazi iz činjenice da se putem nekoliko

jednostavnih eksperimenata mogu utvrditi parametri modela, a potom nam model može dati informacije o procesu, u slučajevima kada promenimo neke od uslova mešanja. Bez modela, ovakav proces bi zahtevao mnogo eksperimenata sa opremom za mešanje kako bi se pronašao najbolji režim rada ili kako bi se utvrdilo kako sistem reaguje na promene uslova mešanja.

Rezultati simulacije ovih sistema se ogledaju u smanjenju troškova rada i smanjenju vremena neophodnog za eksperimente. Međutim, modeli izrađeni za tu svrhu, obično opisuju određeni tip mešalice, što ograničava njihovu primenu na opšte strategije primenjene kod procesa mešanja. Pored toga, većina takvih modela ne dozvoljava direktnu eksperimentalnu identifikaciju njihovih parametara koji se mogu naći na osnovu nezavisnih eksperimenata. Ipak, ova okolnost ne umanjuje značaj matematičkog modelovanja u cilju smanjenja eksperimenata sa održavanjem nivoa pouzdanosti kod predviđanja parametara mešanja.

Cilj ovog rada je bio da se na dva različita načina, izvrši optimizacija procesa mešanja kod vertikalnih i cilindričnih mešalica. Na vertikalnoj mešalici, domaće proizvodnje, osnovni cilj je bio da se naprave izmene u konstrukciji, poboljša efikasnost rada (poboljša process mešanja), skрати vreme mešanja i dodatno poveća ušteda energije, dok je kod cilindrične mešalice cilj bio da se izradom matematičkog modela za ovaj tip mešalice pokuša predvideti ponašanje sistema, koje bi našlo primenu u različitim industrijama i različitim industrijskim uslovima. Kao jedan od rezultata rada, poboljšano je analitičko praćenje procesa – uveden je program za kompjutersku analizu efikasnosti umešavanja po metodi Microtracer[®] i eksperimentalno je potvrđena njegova valjanost.

2. PREGLED LITERATURE

2.1 Mešanje

Studije o ponašanju praškastih materijala dobijaju na značaju poslednjih nekoliko godina zbog potrebe da se dobiju što kvalitetniji i stabilniji proizvodi. Praksa u većini industrijskih grana, pa i u industriji hrane za životinje, je da se utvrde parametri mešanja u eksperimentalnim uslovima, utvrde greške na osnovu rezultata i sve to primeni u samom industrijskom procesu. Sva poboljšanja imaju za cilj skraćanje vremena proizvodnje i smanjenje utroška energije, pri čemu treba da se zadrži visok kvalitet proizvoda (*Paul et al., 2004*).

Budući da mnogi faktori mogu uticati na kvalitet mešanja, od ključnog je značaja da se oni definišu u toku ispitivanja i razvoja novih proizvoda. Fizičke karakteristike kao što su gustina čestica, oblik, veličina čestica i međusobni odnos veličina, površinska svojstva i intenzitet kohezije su veoma važne, pre svega kako bi se utvrdila tendencije ponašanja čestica u procesu mešanja (mešanje ili razmešavanje). Aspekti koji su vezani za opremu, rad i formulacije, kao što su dizajn mešalice i način rada, kombinacija uslova rada, kao i različite recepture takođe su važni i zahtevaju pažnju (*Bertiaux et al., 2006; Chaudhuri et al., 2006; Bellamy et al., 2008*).

Za proces mešanja su veoma važni parametri kao što su nivo punjenja, brzina i vreme mešanja i od njih veoma zavisi uniformnost mešanja kao glavnog cilja. Mnogi radovi se odnose na utvrđivanje zavisnosti homogenosti i vremena mešanja. Dva osnovna načina za praćenje homogenosti su: »online« monitoring homogenosti mešanja i »off line«, koji koriste strategiju periodičnog uzimanja uzoraka iz mešalice (*Pernenkil and Cooney, 2006; Tallon and Davies, 2008*). Izbor zavisi od raspoloživih tehnologija u industrijskom pogonu i vrste mešanja koji će se koristiti za sam proces (šaržno ili kontinuirano mešanje).

Ključni faktor za kontrolu kvaliteta mešanja je dat kroz kvalitet smeša koje se prave. U ovom slučaju, postavlja se pitanje tehničkog i statističkog problema, kada se i u najboljim slučajevima uzima 10-30 uzoraka uz pomoć sonde, a iz serije od

bezbroj mogućih uzoraka (*Andreas et al., 2010*). Sa aspekta zakonske regulative, zahteva se da se dostigne određeni minimum broja uzoraka dobijenih na standardan i prihvatljiv način, umesto da se pokušava rigorozna procena homogenosti cele serije. Vreme mešanja je, pored fiksiranja empirijskih procedura, uglavnom stvar samih kompanija koje proizvode smeše. Kao primer *Muzzio et al. (2002)*, navode tipičan protokol validacije koji se sastoji u pripremi tri proizvodne šarže sa definisanom procedurom uzimanja uzoraka kojima se procenjuje stanje procesa na osnovu sopstvene reproduktivnosti. Sa stanovišta proizvoda, takođe je vredno napomenuti da se u istraživanjima komponenata i mešavina komponenata u praškastom stanju, veoma malo pažnje poklanja uticaju veličine čestica i njihove morfologije na homogenost i stabilnost smeša (raslojavanje i bioraspoloživost) (*Chaudeur et al., 2002*).

U radovima brojnih autora, proučavane su različite vrste mešalica (*Wightman et al., 1998; Kuo et al., 2002; Zhang and Sernas, 2002; Sudah and Muzzio, 2002; Arratia et al., 2006*), njihove konfiguracije, uslovi rada i svojstva materijala. Svrha ovih istraživanja je da se utvrde i razumeju prave osnove ponašanja materijala u mešalicama. Iako sve ove studije obezbeđuju uvid u protok materijala tokom mešanja, komplikovane konstrukcije komercijalnih mešalica, otežavaju direktno poređenje eksperimenta i simulacija. Dakle, postoji stalna potreba za jednostavnim eksperimentima u kojima idealan protok materijala počiva na osnovnim fizičkim zakonima koji važe za mešanje praškastih materijala. Stalni izazov u industrijskoj praksi je da se prati tok mešanja, kako za šaržne, tako i za kontinualne operacije (*Paul et al., 2004*).

Postoje nekoliko različitih istraživačkih pristupa u ispitivanju efikasnosti mešanja. Jedan od njih je korišćenje senzora unutar mešalice, kao što su specijalne kamere (*Wightman et al., 1998; Obregon et al., 2007; Grass et al., 2001; Realpe and Velazquez, 2003*), analiza slike sa dodatim obeleživačima ili NIRS (Near Infrared Spectroscopy) (*Bellamy et al., 2004*) kako bi se utvrdile tačke u kojima je postignut maksimum homogenosti. Drugim pristupom pokušava da se predvidi ponašanje materijala primenom simulacione metode kao što je metoda diskretnih elemenata (DEM) (*Arratia et al., 2006; Baxter et al. 2000; Bertrand et al., 2005; Kuo et al.,*

2002). Cilj simulacije je da se odrede potrebni i dovoljni uslovi koji dovode do postizanja maksimalne izmešanosti u najkraćem mogućem vremenu.

Iznalaženje pouzdanog metoda za određivanje stepena mešanja, omogućava da vreme rada mešalice bude optimizovano kako bi se izbegli nepotrebni troškovi rada i minimizirali efekti segregacije (Kaye, 1997). Najčešći pristup je da se uzorci uzimaju direktno iz mešalice ili na izlazu iz mešalice, što je vrlo direktan način merenja stanja sistema ali zahteva pažljiv pristup kako bi se dobili reprezentativni rezultati (Andreas et al., 2010).

Veliki broj autora u svojim istraživanjima koristi konstitutivne jednačine koje se odnose na stepen deformacije prouzrokovan trenjem i kojima se predviđa ponašanje praškastog materijala (Bertiaux and Marikh, 2004; Dartevelle, 2004; McCarthy, 2003). Jednačine se baziraju na principu ponašanja Njutnovih tečnosti u pogledu viskoziteta, iako su one daleko složenije za praškaste materijale zbog njihovih specifičnih karakteristika.

Protok praškastih materijala može da se odvija u tri različita režima (Dartevelle, 2004; Tardos et al., 2003) koja zavise od koncentracija čestica. Ovi režimi su: spori protok – sa trenjem, intermedijarni protok i brz protok praškastih materijala. U intermedijarnom režimu, ovakvi materijali se ponašaju kao tečnost (Tardos et al., 2003) pokazujući zavisnost od stepena smicanja. U zavisnosti od opreme koja se koristi za mešanje, uspostavljaju se i različiti režimi protoka i moguće je naći više režima u celoj mešalici, u zavisnosti od brzine kretanja čestica.

Posmatrajući sadašnju industrijsku praksu, pažnja takođe treba da bude usmerena na promene u ponašanju procesa mešanja kada se jedna komponenta menja za drugu, koja može biti iste hemijske prirode, ali različitih fizičkih karakteristika. Smeša koja sadrži skoro sferne čestice otpornija je na segregaciju i na nju manje utiče brzo mešanje u mešalicama kod kojih je proces mešanja indukovano mehanizmom smicanja. Iz tog razloga, sastojak koji se menja ne bi trebalo da ima drugačiji oblik čestica jer se na taj način menjaju uslovi pod kojima se odvija mešanje i menja protočnost materijala (Harnby, 2000).

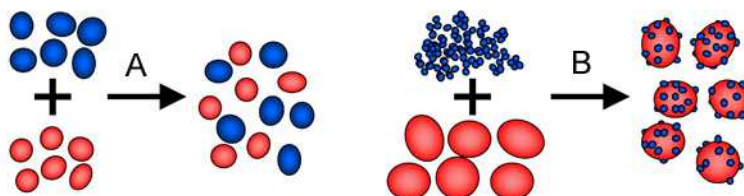
Ispitivanje procesa mešanja je široko zastupljeno kako u eksperimentima (Harnby, 2000; Ingram, 2005; Dauman and Nirshl, 2008; Andreas et al., 2010) tako i u simulacijama (Baxter et al., 2000, Kuo et al., 2002; Figueroa et al., 2009). McCarthy

i sar. (1996) sprovedli su istraživanje gde su urađena poređenja između simulacija i stvarnog procesa. Međutim, metode koje se koriste da se utvrdi da li je i kako nešto izmešano su i dalje ograničene. Većina metoda kojima se utvrđuje stanje izmešanosti, zasnovane su još pedesetih godina prošlog veka na Lejsijevom indeksu (*Lacey, 1943, 1954*) Ovaj metod se zasniva na uzorkovanju, kao i izračunavanju u kom procentu je svaki sastojak prisutan u uzorku. Još jedan način da se definiše proces mešanja, predstavio je *Cleary et al. (1998)*. Ovaj metod se primenjuje u model-sistemima i zasniva se na izračunavanju raspodele verovatnoća sadržaja željene osobine (kao što je masa, gustina ili boja). *Moakher et al. (2000)* koriste metod gde posmatrana osobina predstavlja lokaciju čestice.

Mešanje praškastih materija je kritična operacija u mnogim industrijskim granama, posebno u onim industrijama, gde sadržaj pojedinih sastojaka može biti toksičan, čak i ukoliko je odstupanje od koncentracije 0,5 %. Ukoliko je koncentracija aktivnog sastojka manja od predviđene, dolazi do smanjenja efekata dejstva (*Hendereich and Strauch, 2000*). Da bi ceo postupak proizvodnje neke smeše bio efikasan, uključujući i mešanje, neophodno je sprečiti pojavu segregacije. Segregacija je fenomen koji nastaje usled razlike u veličini ili specifičnoj težini čestica, pri čemu usled njihovog kretanja dolazi do grupisanja u pojedinim delovima smeše (*Figueroa et al., 2009*). U suprotnosti sa mešanjem gasova ili tečnosti gde se mešanje odvija na makro i mikro nivou (na nivou molekula), smeša čvrstih supstanci nikad nije u potpunosti homogena. Čvrste čestice imaju težnju da segregiraju dok gasovi i tečnosti, tj. njihovi molekuli imaju težnju da se mešaju (*Swarbrick, 1990*) Uopšteno gledano, mešanje čvrstih supstanci treba razmatrati sa aspekta njihovih fizičkih osobina. Uniformne čestice je lako izmešati pod uslovom da imaju dobru protočnost, ali i u slučaju protočnih praškastih materija je moguća pojava segregacije usled razlike u veličini, specifičnoj težini, usled delovanja sile inercije na čestice ili nekih drugih karakteristika materijala koji se umešavaju (*Kaye, 1997; Hongming, 2002*).

Veoma fine čestice sa snažnim površinskim silama (čestice veličina ispod 100 μm) i veoma snažnim površinskim silama (čestice ispod 10 μm) imaju sposobnost da formiraju aglomerate (slika 1). Za njihovo razbijanje je neophodna veća snaga i

energija mešanja ali i pored toga mogu dati dobre kohezione smeše (Hongming, 2002)



Slika 1. Formiranje aglomerata u smeši

2.2. Mehanizmi mešanja

U procesu mešanja čvrstih supstanci postoje tri mehanizma mešanja:

- *Difuziono mešanje*, koje ne treba mešati sa molekulskom difuzijom, a koje se odvija usled nasumičnog i haotičnog kretanja pojedinačnih čestica.
- *Konvektivno mešanje*, koje nastaje usled kretanja zapremine ili pojedinih delova (regiona) u smeši, sa jednog mesta na drugo.
- *Smicajuće mešanje* koje nastaje usled formiranja površina ili ploča unutar mase koja se meša a koje se međusobno razlikuju u brzini (Kaye, 1997; Obregon et al., 2010).

U jednom uređaju za mešanje (mešalici) mogu postojati sva tri oblika ili mehanizma mešanja ali uglavnom, jedan ili dva su dominantna. Iz tog razloga mešalice moraju biti konstruisane prema osobinama materijala koji se meša (Hongming, 2002).

Kod kohezivnih smeša preovlađuje smicanje i konvektivno mešanje, te je za njih pogodnija mešalica sa pokretnim alatom za mešanje (plug, spirala ili noževi) dok je mešanje u rotacionom bubnju neadekvatno (Nienow, 1992).

Dok je mešanje dve tečnosti ili čvrste, rastvorljive supstance sa tečnošću relativno lako, mešanje dve ili više čvrstih supstanci gotovo uvek predstavlja

problem. Ispitivanja mehanizma mešanja čvrstih supstanci i predviđanje stepena izmešanosti pojedinih komponenata su manje zastupljena u odnosu na mehanizam mešanja tečnosti.

Prema *Nienow-u (1997)*, postoji nekoliko mehanizama po kojima se odvija proces mešanja. Ovi mehanizmi zavise od agregatnog stanja faza koje se mešaju i razlikujemo sledeće tipove mešanja:

- mešanje tečnih faza
- mešanje čvrste i tečne faze
- mešanje gasovite i tečne faze
- mešanje čvrstih faza

Mešanje praškastih supstanci se razlikuje od mešanja tečnosti i gasova u tri važna aspekta:

- a) Ne postoji jednakost u difuznom kretanju čestica i difuziji molekula tečnosti i gasova. Način na koji se odigrava raspodela čestica zavisi isključivo od protočnih karakteristika materijala, koje su rezultat pojedinačnih karakteristika čestica. Nemoguće je izmešati dve praškaste supstance bez utroška energije i rada.
- b) Iako se molekuli jednofaznih sistema tečnosti ili gasova mogu međusobno razlikovati i mogu kretati na različite načine, na kraju se ipak postiže nasumična raspodela unutar granica sistema. Čestice praškastih materijala obično nemaju konstantne osobine kao molekuli i međusobno se jako razlikuju po fizičkim osobinama. Pošto proces mešanja zavisi od pojedinačnih osobina čestica, što je veća njihova neujednačenost, to je teže postići njihovu raspodelu ujednačenu raspodelu.
- c) Raspodela čestica praškastih materijala je mnogo lošija u poređenju sa raspodelom molekula tečnosti ili gasova. U praksi, to znači da uzorak uzet iz smeše praškastih supstanci ima daleko neujednačeniju teksturu i lošiji kvalitet, nego identičan uzorak uzet iz tečne ili gasovite smeše (*Swarbrick et al., 2001*).

Kod praškastih materijala, čestice menjaju svoju poziciju samo u slučajevima kada je njihovo kretanje izazvano spoljnim dejstvom. Kada se čestice jednom izlože

kretanju, one se kreću bilo da teže da se izmešaju ili segregiraju, što zavisi od osobina čestica ili sile koja izaziva kretanje. U suprotnosti sa tečnim smešama, mešanje praškastih supstanci je reverzibilan proces i proces u kome postizanje ravnoteže zavisi od karakteristika proizvodnog procesa. Smeša tečnosti zadržava svoj stepen izmešanosti ili ga čak i poboljšava kretanjem u proizvodnom procesu, dok dobro izmešana, praškasta smeša može biti u potpunosti razmešana prolaskom kroz proizvodni proces ili neadekvatnim rukovanjem (*Nienow, 1997*)

Rukovanje i operacije sa praškastim materijalima i njihovo mešanje i pojava segregacije su blisko povezani. Ukoliko materijal ima snažnu tendenciju segregacije, utoliko će transport i kontrola biti teži. Ispitivanje mehanizma po kome se odvija proces mešanja i segregacije i dobijeni rezultati, u mnogome utiču na projektovanje procesa i kontrolu u procesu (*Swabrick, 2001*).

Najveći uticaj na mehanizam mešanja i segregacije praškastih materijala imaju njihove protočne karakteritike. Dobro protočni praškasti materijali i kohezivni praškasti materijali i njihove smeše, iziskuju različit pristup u mešanju i rukovanju. Dobro protočni materijali su lakši za rukovanje i transport, lakše se mešaju ali im je veća tendencija segregacije. Kohezivni praškasti materijali prouzrokuju probleme u protoku i transportu ali su ovakve smeše daleko stabilnije (*Nienow, 1997*)

2.3. Faktori koji utiču na mešanje

2.3.1. Veličina čestica

Kvalitet neke smeše zavisi od osobina sastojaka, osobina uređaja za mešanje i uslova mešanja. Najveći uticaj na proces mešanja imaju osobine samih čestica a to su, veličina čestica i njihov oblik ali ne treba zanemariti ni druge faktore. Čestice koje se razlikuju po veličini, teže da segregiraju i to tako da se finije čestice talože na dnu uređaja. Fine čestice (veličine ispod 10 mikrona), su kohezivne usled smanjenja efekata gravitacione sile, a ova pojava vodi ka uređenom mešanju (*Honming, 2002; Bellamy. et al., 2008; Portillo et al., 2009*)

Da bi se ispunio optimum zahteva, koncentracija i odnos svih sastojaka smeše treba da budu dobro izbalansirani, tako da je formulacija smeša važan i ključni korak u proizvodnji neke smeše. Osoba koja formuliše recepturu mora da razmotri izvor sastojaka na osnovu njihovih fizičkih i hemijskih karakteristika, bioraspoloživosti, njihove interakcije kada se pomešaju, karakteristika pri rukovanju kao i ekonomske implikacije na finalni proizvod, pre nego što se donese konačan zaključak. Mešanje je napredovalo od jednostavnog ručnog mešanja nekoliko sastojaka, pa sve do mešanja velikog broja različitih sastojaka pri čemu se programiranje aktivno koristi u kontroli mešanja. Međutim, osnovni koncept mešanja sastojaka koji rezultira homogenom mešavinom je ostao nepromenjen. (*Carson et al., 1986*)

Čestice uniforme veličine, gustine i sfernog oblika dobro se mešaju i formiraju homogenu smešu, a mogućnost segregacije je time svedena na minimum. Na primer, kod proizvodnje smeša u industriji hrane za životinje, mineralne komponente imaju u svojoj strukturi krupnije čestice, dok su vitamini obično dobro usitnjeni, finije granulacije. Postizanje homogene smeše ove dve supstance je u principu teško (pesak i šljunak efekat). Međutim, homogena smeša se može dobiti naknadnom obradom minerala (usitnjavanjem) do željene veličine čestica i poboljšanjem protočnosti (*Geldart et al., 2006*)

Većina radova o ovom pitanju je fokusirana na problem segregacije (*Alexander et al., 2003, 2006; Chaudhuri et al., 2006*), dok se neki radovi bave uticajem promene veličine čestica unutar sistema na distribuciju, tj. raspodelu veličine čestica. Radovi objavljeni u skorije vreme se bave dvodimenzionalnim sistemima mono-veličina čestica (*Hajra and Khakhar, 2005; Jordanof et al., 2008; Tardos et al., 2003*).

U nedavno objavljenom radu *L. Obregon, et al., 2010*, autori su predstavili jednostavan uređaj za ispitivanje kretanja praškastih materijala u kome je ispitan uticaj veličine čestica i njihovog oblika na način kretanja. Utvrđeno je da se veće čestice brže kreću u odnosu na manje i da se ova činjenica može uzeti u obzir i kod industrijskih mešalica kao što su cilindrične, vertikalne mešalice sa pužem, V-mešalice i sl.

Vreme koje je potrebno da bi se postigla ravnoteža kod mešanja, raste sa porastom variranja u obliku i veličini čestica kao i sa porastom osobina adhezivnosti (Swabrick et al., 2001; Siiria et al., 2009). Ova zavisnost je povezana sa protočnošću praškastih materijala. Protočni materijali se mnogo brže i lakše mešaju ali je pojava segregacije daleko izraženija. Poslednjih godina ovom problemu se posvećuje veći značaj, zbog mogućnosti kompjuterske simulacije mešanja, kao načina za predviđanje ponašanja praškastih materijala (Nienow, 1997)

Sa smanjenjem veličine čestica, gravitacione sile između čestica postaju manje dominantne a veze između čestica prouzrokovane Van der Valsovim silama, elektrostatičkim privlačenjem ili vlagom postaju izraženije. To dovodi do stvaranja aglomerata i pod određenim uslovima, ovakvo vezivanje može imati prednosti i uticati da se dobije veoma kvalitetna smeša.

Veličina čestica je veoma važan faktor u definisanju protočnih karakteristika smeše i praksa ukazuje na sledeće (Hongming, 2002):

- (a) smeše sa veličinom čestica većom od 75 μm imaju tendenciju segregacije
- (b) redukcijom veličine čestica ispod 75 μm znatno se smanjuje segregacija ali može biti registrovana sve do veličine čestica od 10 μm
- (c) smeše sa veličinom čestica ispod 10 μm ne podležu zanačajnijoj segregaciji

Kao generalno pravilo, u sistemima u kojim se javlja segregacija, ne dolazi do problema u protoku i obrnuto. Međutim, u prelaznim zonama protoka mogu se javiti oba problema istovremeno (Kaye, 1997).

2.3.2 Protočnost materijala

Prema Hongmingu (2002), kohezija između čestica može biti izazvana različitim silama kao što su, kapilarne sile, Van der Valsove sile i elektrostatički naboj. Svaki od navedenih faktora može imati snažan uticaj na ponašanje praškastih materijala i njihovu protočnost.

I druge osobine smeše značajno utiču na njene protočne osobine. Dodatak male količine vode može doprineti da smeša koja ima jaku tendenciju segregacije, promeni svoje osobine i postane nesegregirajuća i kohezivna (Kaye, 1997)

Ukoliko je jedna komponenta u smeši veoma usitnjena i ima daleko manju veličinu čestica u odnosu na druge, može se desiti da finije čestice okruže ili prekriju one grublje. U tom slučaju finije čestice gube svoju slobodu kretanja i moguće je napraviti dobru, nesegregirajuću smešu (Baxter et al., 2000).

Međutim, najuobičajeniji metod sprečavanja segregacije je ujednačavanje veličina čestica komponentata smeše. Na žalost, u praksi, i najmanje razlike u veličini čestica mogu dovesti do segregacije i van laboratorijskih uslova nije uvek moguće predvideti ponašanje smeše (Carson et al., 1986).

U industrijskim uslovima, pri radu sa dobro protočnim materijalima, nije moguće potpuno eliminisati segregaciju već je samo smanjiti. To se može postići pažljivim odabirom sastojaka i njihovih osobina, kao i načinom mešanja (Heindereich et al., 2000),

Nasipna masa. Gustina praškastih materijala je definisana njihovom nasipnom masom. Nasipna masa predstavlja masu jedinice zapremine materijala. Određivanjem ove veličine, mogu se sagledati mere disperzije veličine čestica koje mogu da utiču na protok materijala. Ispitivanja pokazuju da nasipna masa materijala nelinearno opada sa smanjenjem veličine čestica, što je u saglasnosti sa rezultatima mnogih autora (McNail et al., 2004; Hales et al., 2009) Ova pojava je povezana sa smanjenjem mase, zapremine i specifične površine čestica kao i broja čestica unutar definisane zapremine. Sve ovo vodi do jačanja sila između čestica čime se sprečava gušće "pakovanje" čestica, smanjuje učešće čvrste faze i povećava poroznost materijala. (Zagorodniy, 2003)

Ugao nasipanja. Ugao nasipanja predstavlja lako merljivi parametar protočnosti materijala. Ugao nasipanja predstavlja onaj ugao koji se formira između horizontalne površine i nagiba kupe materijala. Kupa materijala se formira slobodnim padom ili isticanjem materijala bez posebnih uslova (Geldart et al., 2006). Postoji više razloga zbog čega je poželjno odrediti ugao nasipanja za određeni materijal, a to su:

- dobijanje reproduktivne numeričke vrednosti za određeni materijal

- sagledavanje mere trenja i kohezivnosti praškastih materijala
- indirektno određivanje ostalih fizičkih veličina kao što su veličina čestica, oblik i poroznost koje direktno utiču na protočnost (*Prescott and Barnum, 2009.*)

Masa sabijanja. Važna fizička osobina materijala je i masa sabijanja koja predstavlja maksimalnu gustinu pakovanja praškastog materijala ili smeše materijala, koja se dobija kada se materijal podvrgne definisanoj, spoljašnjoj sili. Kao i nasipna masa, ova veličina zavisi od veličine i oblika čestica, gustine, sila kohezije i vlažnosti materijala. Dve najvažnije osobine, odnosno veličine važne za karakterizaciju materijala, a koje proističu iz nasipne mase i mase sabijanja su Indeks sabijanja (*Karov indeks, Car, 1965*) i Hausnerov odnos (*Hausner, 1967*). Izračunavanje ovih veličina se vrši prema sledećim formulama (1 i 2):

$$\text{Indeks sabijanja} = \frac{V_0 - V_s}{V_0} \quad (1) \qquad \text{Hausnerov odnos} = \frac{V_0}{V_s} \quad (2)$$

gde je

V_0 zapremina pre sabijanja

V_s zapremina nakon sabijanja

Korisnost ove dve veličine, koje se baziraju na smanjenju zapremine materijala tokom sabijanja, je u njihovom svojstvu da određuju i predvide protočnost materijala. Što je indeks sabijanja manji, utoliko su materijali protočniji. Porast ove vrednosti je proporcionalan porastu sila adhezije i trenja unutar materijala (*Podczek, 1998*).

Hemijske osobine. Aktivnost komponenata kao što su minerali, vitamini i lekovi, u velikoj meri utiču na način pripreme smeša i sam proces umešavanja. Prilikom formulacije smeše, a na bazi zahteva, potrebno je obratiti posebnu pažnju na analitičku vrednost ovih komponenata, kako se postigla odgovarajuća koncentracija u smeši. Neophodno je izvršiti detaljnu analizu svih komponenata pre nego što se uključe u proces pravljenja smeša, kako bi se na bazi dobijenih rezultata moglo uticati na način njihove pripreme. Komponente organskog porekla lako apsorbuju vlagu iz spoljašnje sredine, dok su neorganske komponente one koje doprinose gustini smeše (*Hendereich et al., 2000*).

Tabela 1. Fizičke i hemijske osobine komponenata (Nazir, 2007; www.energomix.com)

Fizičke osobine	Hemijske osobine
Veličina čestica	Jačina
Oblik čestica	Čistoća
Gustina čestica	pH
Protočnost	Reaktivnost
Moć sabijanja	Stabilnost

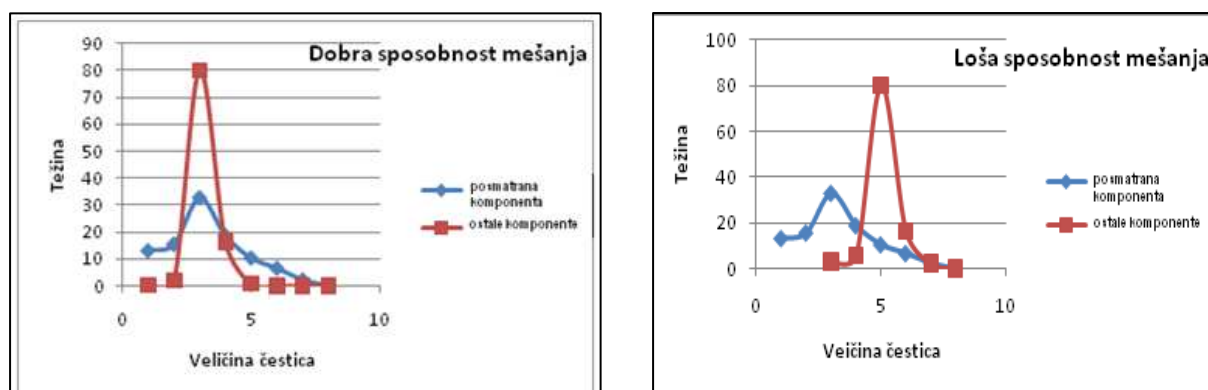
Kompatibilnost komponenti. Prilikom pravljenja smeša, vrlo često se postavlja pitanje kompatibilnosti komponenata.

Komponente su kompatibilne ako su dva kriterijuma ispunjena (slika 2):

1. Profil veličine čestica jedne komponente obuhvata i druge komponente koje se mešaju.

2. Gustina jedne komponente je istog reda kao i drugih komponenata

U praksi je opšte prihvaćeno, da je moguće postići homogenu i stabilnu smešu ukoliko je odnos gustina dve komponente između 1 i 3. (Anon, 2002).



Slika 2. Primeri sposobnosti mešanja prema raspodeli veličine čestica

Vreme mešanja. Vreme mešanja je ključno za postizanje homogene smeše. Evidentno je, da vrlo često, kratko vreme dovodi do neizmešanosti, a predugo vreme mešanja do razmešavanja smeše. (Benkhe, 2001).

Redovna procena kvaliteta mešanja u određenoj mešalici treba da bude postignuta analizom serije uzoraka za određeni indikator mešanja i izražavanjem

rezultata preko koeficijenta varijacije. Vrednost koeficijenta varijacije (CV) treba da je manja od 10% i indikator je dobrog mešanja. Srednja vrednost serije uzoraka za posmatrani indikator treba da bude u dozvoljenim granicama analitičkih varijacija. Svako odstupanje od očekivanog rezultata ukazuje na neke od sledećih grešaka (Paul et al., 2004)

- Neadekvatno vreme mešanja
- Nepravilan redosled dodavanja sastojaka
- Izbor neodgovarajuće mešalice
- Neusklađene osobine sastojaka
- Pohabanost delova mešalice
- Velika analitička varijacija u analizi sadržaja ispitivane komponente

Vreme mešanja koje je potrebno da bi se proizvela homogena smeša, trebalo bi odrediti za svaku mešalicu pojedinačno. Vreme mešanja je u funkciji same konstrukcije mešalice i zavisi od rotacione brzine kretanja pokretnih delova (spirale, lopatice), nivoa punjenja, osobina materijala koji se meša, itd. (Harnby, 2000).

2.4. Klasifikacija sistema praškastih materijala

Veoma pogodan i konzistentan sistem za klasifikaciju čestica praškastih materijala, a koji je ustanovljen još 70-tih godina (Lai, Fan, 1969) trebalo bi da olakša istraživanja mešanja čvrstih čestica. Ovakvi sistemi se mogu svrstati u tri opšte klase: jednokomponentna (unitarna), dvokomponentna (binarna) i višekomponentna klasa. Naravno, jednokomponentna klasa koja se sastoji od identičnih čestica ne podleže istraživanjima i razmatranju procesa mešanja. Dvokomponentni sistem sadrži dve grupe čestica, a čestice višekomponentnih sistema mogu biti iz više različitih grupa. Svaka vrsta čestica sistema se može dalje podeliti u dve podklase - homogene i heterogene. Homogena podklasa ima iste fizičke karakteristike i razlikuje samo po određenoj karakteristici, kao što je npr. boja, radioaktivnost, itd. Materijali sa fizičkim osobinama koje ne dolaze u interaktivni odnos sa radom mešalice smatraju se trejserima (Lai; Fan, 1969).

S druge strane, heterogena podklasa ima različite fizičke karakteristike, kao što su veličina, gustina ili oblik. Na primer, čestice sistema koji sadrži četiri različite

kombinacija veličine i gustine se zove četvero-komponentni ili polinari heterogeni sistem čestica. Sistem čestica opisan od strane Lacey-a (1954) koji sadrži identične čestice se razlikuje samo po boji (crna i bela) je dvokomponentni ili binarni homogeni sistem čestica. Primeri različitih klasa čestica sistema su dati u tabeli 2.

Tabela 2. Klasifikacija sistema prema osobinama čestica (Lai et al., 1975)

Klasifikacija sistema	Binarni ili dvokomponentni sistemi koji sadrže dve vrste čestica		Višekomponentni sistemi koji sadrže više od dve vrste čestica	
	Homogeni	Heterogeni	Homogeni	Heterogeni
Definicija	Iste fizičke karakteristike ali se razlikuju po boji, radioaktivnosti, itd.	Različite fizičke karakteristike, npr. veličina, oblik, itd.	Iste fizičke karakteristike	Različite fizičke karakteristike
Primer	Crne i bele čestice istog materijala sa uniformnom distribucijom	Materijal sa dve različite veličine čestica	Čestice sa dve ili više različitih boja istog materijala i uniformne distribucije	Čestice različite veličine, oblika i gustine

2.5. Vrste mešalica i konstrukcija

Mešalice za praškaste materijale su relativno jednostavne mašine, male cene koštanja, klasifikovane prema mehanizmu mešanja koji se odvija u njima (Harnbi, 1992). U industriji, a naročito industriji hrane za životinje, najčešće se koriste šaržni tipovi mešalica, a glavni razlozi za to su jednostavnost, lako čišćenje posle upotrebe, neagresivno mešanje koje ne izaziva pregrevanje proizvoda. Takođe je uobičajeno da se nakon procesa mešanja smeša direktno odlaže u ćeliju ili kontejner za skladištenje i transport, čime se izbegavaju operacije koje mogu da izazovu ozbiljne promene u homogenosti smeše (Swabrick, 2001).

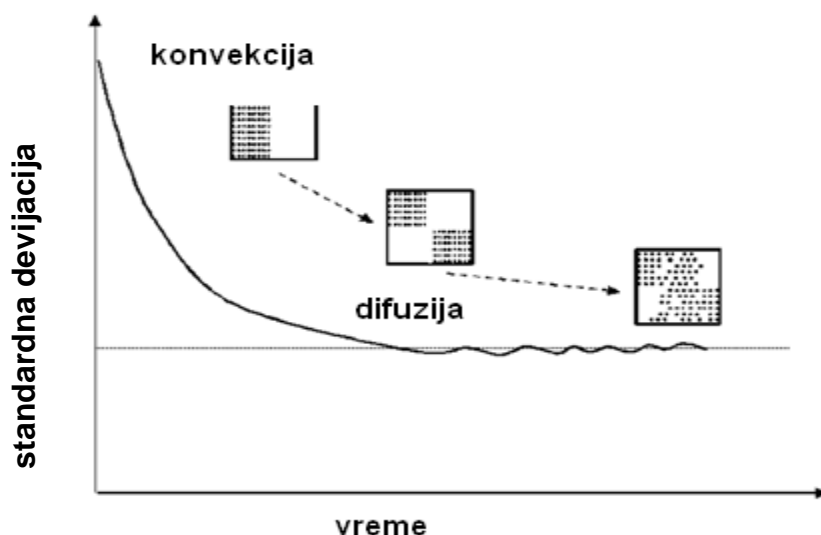
Prema istim navodima (Swabrick, 2001) u pojedinačnoj operaciji mešanja, nije preporučljivo mešati komponente čiji je udeo manji od 0,5%. Proces mešanja i postizanje ravnoteže se obično prolongira, zbog malog udela komponente. Standardna procedura predviđa pravljenje predsmеше sa komponentama čiji je udeo

daleko manji u odnosu na ostale, u manjim uređajima za mešanje a nakon toga dodavanje u glavni proces mešanja.

Mešalice za praškaste materijale (konvektivne, fluidizacione ili statične) su klasifikovane prema mehanizmu mešanja: konvekcija, difuzija i trenje, koji mogu biti pojedinačni ili kombinovani (*Harnby, 2000*). Izbor zavisi od materijala koji se meša, uključujući karakteristike kao što su gustina, veličina čestica i udeo svake komponente, pri čemu je neophodno kontrolisati svaki od navedenih faktora kako bi se sprečila pojava segregacije. Sistemi koji sadrže čestice različitih osobina imaju tendenciju segregacije pod određenim uslovima u toku procesa mešanja, što se odražava u manjem ili većem stepenu na kvalitet proizvoda (*Wang et al., 1977, Moakher et al., 2000; Sudah et al., 2002*). Imajući u vidu tu činjenicu, validacija mešanja je veoma važna i može da spreči nehomogenost, pogotovo ako se radi o komponentama čija neravnomerna raspodela unutar smeše može prouzrokovati negativne efekte. Proces mešanja se validuje proverom homogenosti preko uzimanja uzoraka u tri različita nivoa mešalice (vrh, sredina i dno) i određivanjem sadržaja posmatrane aktivne supstance u ovim uzorcima (*Aiache and Beissac, 2006*). S obzirom na postupak utvrđivanja homogenosti, neki kriterijumi moraju biti uspostavljeni nakon uzorkovanja. Na primer, u slučaju uzorkovanja od 10 uzoraka, srednja vrednost ispitivanog parametra mora biti u opsegu oko $\pm 7.5\%$ u odnosu na stvarni sadržaj ili svaka pojedinačna vrednost mora ležati u $\pm 15\%$ intervalu u odnosu na stvarni sadržaj (*Marikh et al., 2008*).

Kinetika mešanja u bilo kojoj vrsti mešalice može se pratiti merenjem (ili procenom) standardne devijacije smeše za različito vreme mešanja. Tipičan izgled kinetičke krive (slika 3) počinje sa eksponencijalnim propadanjem sledeći asimptotu koja se može predstaviti preko niza oscilacija. Može se pretpostaviti da prvi deo krive predstavlja brzo smanjivanje heterogenosti zbog premeštanja mase velikih razmera, indukovane konvekcijom i mehanizmom trenja. Ove makroskopske pojave na kraju postaju mnogo neefikasnije u postizanju mešanja. U ovom slučaju, mešanje se postiže u sledećoj fazi gde se difuzionim mehanizmom pojedinačne čestice (ili aglomerati) premeštaju kako bi se postigla bolja izmešanost. Konačno, dok difuzioni mehanizam favorizuje mešanje, istovremeno se odigrava segregacija, a zatim „filtriranje” ili efekat sejanja, tako da se javljaju oscilacije u poslednjem delu krive

usled kompetitivnosti ova dve pojave (Bertiaux et al., 2004; Alhwaige, 2007) (slika 3.).



Slika 3. Mehanizmi koji se odigravaju u toku procesa mešanja

U proizvodnji hrane za životinje, u upotrebi su različite vrste i tipovi mešalica ali se uglavnom radi o mešalicama konvektivnog tipa, horizontalnim i vertikalnim. U konvektivnim mešalicama, postoji pokretni, radni deo koji se okreće unutar statičnog kućišta. Čestice se premeštaju sa jedne lokacije na drugu, unutar mase koja se meša.

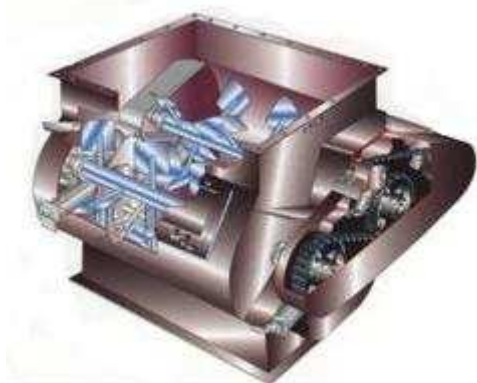
Ovakve mešalice imaju najširu primenu u industriji. Unutrašnjost mešalice je izrađena od materijala otpornih na habanje i pogodnih za čišćenje i pražnjenje mešalice. Kapacitet ovih mešalica ide do 20 m³ ali može biti i veći u zavisnosti od namene. U zavisnosti od položaja pokretnog dela ove mešalice mogu biti vertikalne i horizontalne. Ovakve mešalice se najčešće izrađuju sa pokretnim delom u vidu spiralnih traka, pužnice, lopatica i sl., koji obezbeđuje dobro mešanje u svim zonama mešalice i smanjuje mogućnost postojanja "mrtvih uglova" u mešalici (slike 4 , 5, 6 i 7) .



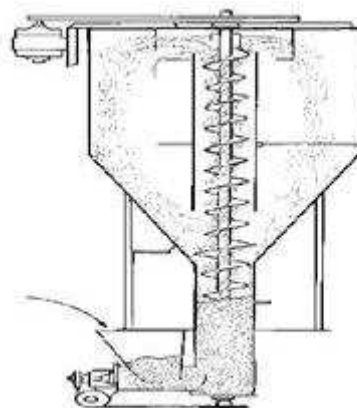
Slika 4. Mešalica tipa nauta sa pužnicom



Slika 5. Cilindrična mešalica



Slika 6. Horizontalna mešalica sa fluidizacijom



Slika 7. Vertikalna mešalica sa pužnicom kroz sredinu

Mešalice sa fluidizacijom (slika 6) spadaju u veoma brze i efikasne mešalice. U procesu mešanja, obezbeđuje se protok vazduha između čestica koje se mešaju. U takvom sistemu nasipna masa praškastih materijala se smanjuje, a individualna pokretljivost čestica se povećava. Ukoliko je protok vazduha dovoljno veliki, dolazi do turbulentnog mešanja gde je pokretljivost čestica izuzetno velika i ove mešalice obezbeđuju odličan stepen izmešanosti. Međutim, kod ovakvog tipa mešalica, postoji konstantna opasnost od segregacije ukoliko trurbulentno kretanje nije zadovoljavajuće. Proces fluidizacije smeše se odvija u periodu od 30 sekundi a vreme mešanja je drastično skraćeno i iznosi svega 1 do 2 minuta (Nienow, 1992).

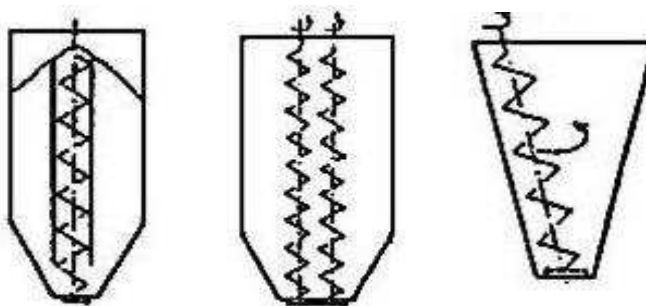
U jednom uređaju za mešanje mogu postojati sva tri oblika ili mehanizma mešanja ali uglavnom, jedan ili dva su dominantna. Iz tog razloga mešalice moraju biti konstruisane prema osobinama materijala koji se meša. Kod kohezivnih smeša preovlađuje smicanje i konvektivno mešanje, te je za njih pogodnija mešalica sa pokretnim alatom za mešanje (plug, spirala ili noževi) dok je mešanje u rotacionom bubnju neadekvatno (Nienow, 1992; Kaye, 1997).

U tabeli 3 su prikazane vrste mešalica i mehanizam mešanja koji se odvija u njima.

Tabela 3. Mehanizmi mešanja u različitim tipovima mešalica

Mešalica	Mehanizam	Primer
Cilindrična mešalica	difuzno i smicajuće mešanje	mešalica u obliku bubnja, konusna mešalica, V mešalica
Konvektivna mešalica	konvektivno i smicajuće mešanje	protivstrujna mešalica, mešalica sa lopaticama
Fluidizaciona mešalica	difuzno i konvektivno mešanje	brza mešalica AIRmix
Statička mešalica	difuzno i konvektivno mešanje	silomikser, Keniks i Ross mešalice

2.5.1 Vertikalne mešalice



Slika 8. Tipovi vertikalnih mešalica

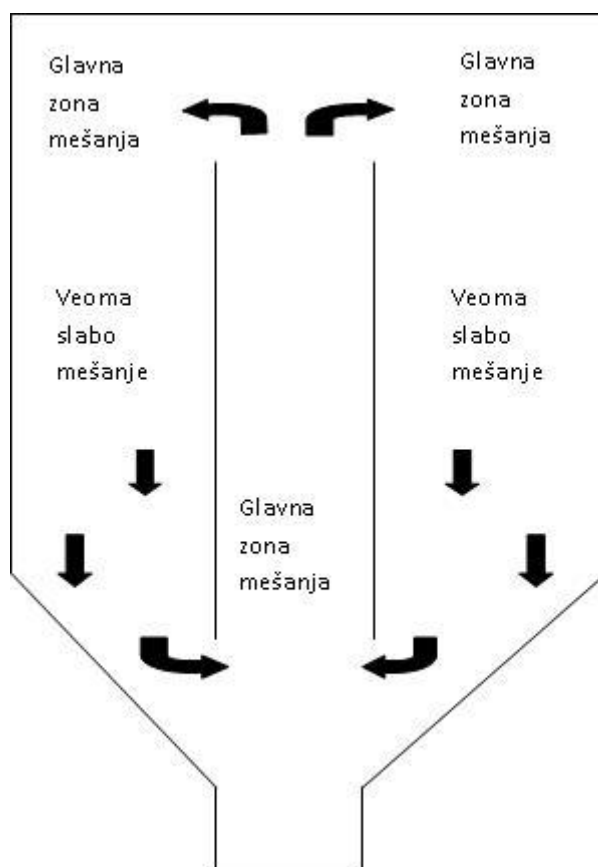
Vertikalna mešalica (slika 8) je u prošlosti bila veoma prisutna u industrijskoj proizvodnji hrane za životinje. Međutim, u većini pogona je zamenjena horizontalnom mešalicom i može se naći još u malim pogonima ili na farmama i seoskim domaćinstvima. Razlog njihove primene u prošlosti je ležao u niskoj ceni koštanja,

malim troškovima održavanja, raznovrsnosti i malom prostoru koji zauzima. Novije vrste vertikalnih mešalica su dosta unapređene, sa većom efikasnosti mešanja ali nedovoljno da bi ih vratile u masovniju primenu.

Vertikalne mešalice u osnovi sporije mešaju u poređenju sa horizontalnim mešalicama istog kapaciteta (*Harnby, 1992; Benkhe et al., 1992; Kaye, 1997*). Obično su dizajnirane sa jednim ili dva vertikalna puža u sredini, s tim što su dvopužne znatno efikasnije od jednopužnih. Ove mešalice se ne čiste same i zahtevaju dodatne napore kod sprečavanja unakrsne kontaminacije i prenošenja u narednu šaržu. Vreme pražnjenja je isto kao i kod horizontalne mešalice ali zbog konstrukcionih karakteristika, horizontalne mešalice se lakše i potpunije prazne (otvor na dnu mešalice), dok je kod vertikalnih mešalica neophodno obezbediti dodatno čišćenje (vakuum, pneumatsko).

Dodatak vode, melase, ulja ili nekih drugih tečnih komponenti se obično postiže doziranjem u donjem delu mešalice ali je znatno efikasniji način doziranja preko mlaznica postavljenih na vrhu mešalice. Smeše sa dodatkom tečnih komponenti je neophodno mešati znatno duže od suvih smeša, kako bi se razbili aglomerati koji se stvaraju pri dodavanju tečnosti i kako bi se postigla uniformna raspodela svih sastojaka. U ovaj tip mešalice nije preporučljivo dodavati više od 3% tečnosti ali je i pri tim količinama neophodno obezbediti adekvatno čišćenje unutrašnjosti mešalice nakon pražnjenja (*Benhke et al., 1992, www.feedmachinery.com*).

Vreme mešanja u vertikalnim mešalicama kreće se u rasponu od 15-20 minuta. Osnovni problem kod ovog tipa mešalice je, zahvaljujući favorizovanom aksijalnom mešanju, postojanje statičnih zona u mešalici gde je mešanje veoma slabo ili ga gotovo nema. Glavna zona mešanja se nalazi u zonama na ulasku i izlasku iz spirale (puža) mešalice (slika 9). Iz razloga što radijalnog mešanja gotovo da i nema, neophodno je dosta vremena da se celokupna količina materijala transportuje kroz mešalicu i na taj način izmeša. Kompletan ciklus mešanja u ovom tipu mešalice je prema tome znatno duži u odnosu na horizontalnu mešalicu istog kapaciteta (*Goodband, 1990*).



Slika 9. Zone mešanja u vertikalnoj mešalici

2.5.2 Cilindrične mešalice

Tipična cilindrična mešalica, sastoji se od cilindričnog bubnja sa nagibom od 45° , fiksiranom na okviru, koji se nalazi između dva valjka koja pokreće motor. Pod ovim uslovima materijal se podvrgava rotacionom i kaskadnom kretanju, omogućavajući radijalno i aksijalno mešanje. Ovakav način kretanja se posmatra kao niz reverzibilnih površina, koje imaju karakter lavine (Chaudaur, 2002).

U istraživanjima (Obregon, 2010) u oblasti fizike ali i hemijskog inženjerstva, većina ispitivanih mešalica je nesumnjivo na bazi horizontalnog, rotirajućeg bubnja u kome postoji samo radijalno kretanje ali i segregacija, što se razlikuje od haotičnog mešanja koje se odvija u industrijskim mešalicama. Tek su u poslednjih 10 godina eksperimentalne studije pokazale da je primena malih amplituda vertikalnog kretanja

dala rezultate u veoma značajnom poboljšanju aksijalnog mešanja kod rotirajućeg cilindra (*Wightman and Muzzio, 1998*)

2.6. Primena matematičkog modela u predviđanju procesa mešanja

Procesi koji uključuju rad sa česticama, bez obzira na njihovu veličinu, dobro su poznati kao ekstremno nepredvidivi, uglavnom zbog mezoskopske prirode granula, tj. praškaste sredine. Razumevanje procesa, uglavnom zbog projektovanja tehnologije i pojedinačnih operacija, a u skladu sa konceptom hemijskog inženjerstva (ušteta energije, cena koštanja, zaštita okoline) u osnovi zahteva jedan sistemski pristup. Zbog svoje jednostavnosti, fleksibilnosti i formalizma, stohastički model baziran na Markovljevom nizu je veoma pogodan matematički instrument za ovakvu vrstu modelovanja. Markovljev niz je do sada najčešće upotrebljavan baš upravo u tehnologiji praškastih materijala, pri rešavanju određenih problema kod mešanja, uključujući protok materijala i ponašanje u mešalici, kod filtracije, klasifikacije mlevenja i sl. (*Fan et al., 1978; Habbache et al., 2002; Ponomarev et al., 2009; Ponomarev, 2006; Bertiaux et al., 2004; 2005; Marikh et al., 2006*)

Mešavine praškastih materijala se mogu svrstati u dve glavne grupe: prvu koja uključuje slobodno protočne materijale i drugu koja uključuje kohezivne ili interaktivne materijale. Slobodno protočne smeše obično sadrže individualne čestice koje se kreću samostalno ili slobodno, dok kohezivne smeše generalno imaju posebne mehanizme vezivanja, koji dozvoljavaju da se čestice kreću samo u obliku klastera ili međusobno povezanih čestica. Istraživanja idu uglavnom u pravcu razvoja i dizajna opreme za proizvodnju praškastih smeša i metoda za smanjenje segregacije (*Alonso and Alguacil, 1999*).

Slobodno protočne smeše

Slobodno protočne smeše imaju poželjne osobine kao što su minimalne potrebe za podmazivanjem i kontakt sa površinama. Međutim, ovakve smeše su podložne segregaciji pojedinih komponenti u naknadnoj obradi nakon mešanja. Čestice u ovakvoj smeši mogu da se kreću glatko i samostalno u određenom pravcu s obzirom na pojedinačne sile. Slobodno protočne smeše se moraju upotrebljavati i

čuvati na odgovarajući način, napr. pakovanjem u polietilenske kese pod vakuumom (Bertiaux et al., 2004, 2009).

Jedan od najuobičajenijih ciljeva u tehnologiji praškastih materijala jeste objasniti promene u određenom materijalu u zavisnosti od vremena, a preko grupe čestica koje reprezentuju ceo sistem. Veoma često, promene imaju svojstva slučajnog događaja ili je veoma jasno uočljiva slučajnost događaja, što zahteva pristup verovatnoće kod njenog opisa. Markovljev niz podrazumeva podelu osobina posmatranog sistema u diskretne intervale kao i svođenje svih promenljivih na cele brojeve. Diskretizacija nije samo numerički pristup rešenju ravnotežne jednačine. Ona omogućava izbor elementarne veličine parametara koji se mogu odrediti direktno iz odgovarajućih eksperimenata. Ponekad nivo diskretizacije može da obuhvati i ceo sistem, u zavisnosti od ciljeva i obima istraživanja (Dyer and Greenhil, 2000),

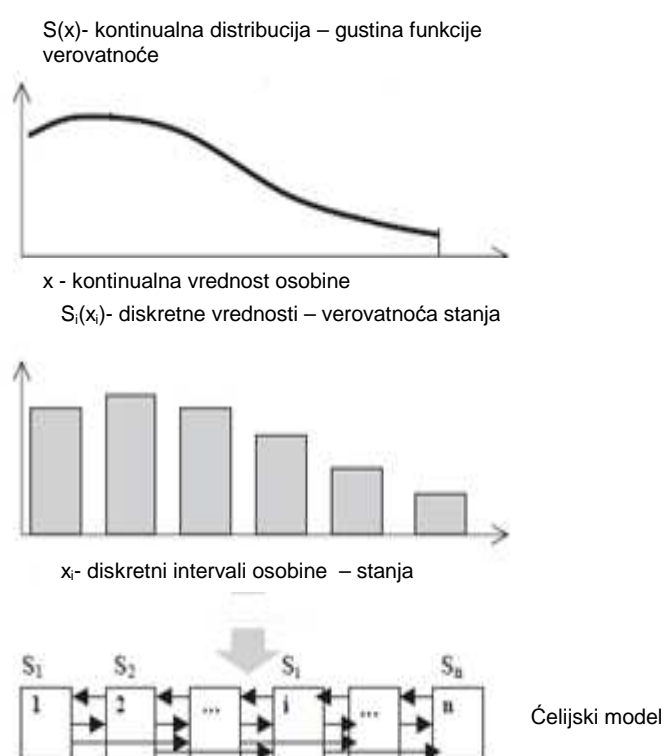
Prevođenje iz kontinualnog opisa procesa u model Markovljevog niza je baziran na podeli intervala u kojem se dešavaju promene u konačan broj – n diskretnih intervala, koja nazivamo stanjima sistema. U tom slučaju, gustina funkcije verovatnoće se zamenjuje sa verovatnoćom određenog stanja S_i . Sva moguća stanja čine jedno, prostorno stanje problema, a set njihovih verovatnoća čini vektor stanja S , veličine $n \times 1$ (3) (Bertiaux et al., 2005);

$$S = \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ \dots \\ S_n \end{bmatrix} = [S_1 \ S_2 \ \dots \ S_n]' \quad (3)$$

Gde ' označava transponovanje vektora tj. matrice., a S vektor stanja

Za veliki broj čestica S_i se takođe može reći da relativan broj čestica pripada stanju i . Ukupno vreme trajanja observacije se takođe može podeliti u diskretne intervale vremena Δt i trenutno vreme može biti predstavljeno kao sekvenca diskretnih vrednosti $t_k = \Delta t (k-1)$, $k = 1, 2, \dots$. Ovo omogućava zamenu kontinualnog vremena sa celim brojem k . Takođe, sve promenljive u pristupu postaju celi brojevi. Tokom k -tog prelaza, vektor stanja se menja i prelazi iz S_k u S_{k+1} . To znači da

čestica menja svoje osobine i da prelazi u drugi interval svoje osobine. Primer prelaska u moguće stanje je prikazan na slici 10. Svaki prelaz ima svoj stepen verovatnoće da se dogodi a verovatnoća se odnosi i na deo čestica koje se nalaze u jednoj ćeliji i prelaze u određenom pravcu. Vrednost P_{ij} označava relativni udeo čestica u ćeliji j koji prelaze u ćeliju i . Ako je $i=j$, P_{ij} je verovatnoća da će čestice ostati unutar ovih ćelija tokom prelaza (Bertiaux et al., 2005; Ponomarev, 2006).



Slika 10. Primeri distribucije stanja

Korelacija između S_k i S_{k+1} se može opisati sledećom formulom (4):

$$S_{k+1} = P S_k \quad (4)$$

Gde je P matrica prenosne verovatnoće ili tranziciona matrica – bazični operator modela Markovljevog niza. Ona sa sastoji od tranzicionih verovatnoća i može se formirati prema sledećem pravilu: j -ta kolona matrice sadrži verovatnoću koja se odnosi na j -tu ćeliju sistema. Verovatnoća da će doći do prenosa u i -tu ćeliju se

nalazi u i -tom redu ove kolone. U opštem slučaju, postoje samo dva ograničenja za P_{ij} , a koja proizilaze iz matematičke suštine problema (5):

$$0 \leq P_{ij} \leq 1$$

$$\sum_{i=1}^n P_{ij} = 1, j = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

Uspešna primena jednačine, omogućava opis toka procesa u zavisnosti od vremena ukoliko je poznat inicijalni vector stanja S_0 . Ukoliko je matrica nezavisna od vremena i stanja, process je linearan i njegova kinetika se može predstaviti jednačinom (6):

$$S_k = P^k S_0 \quad (6)$$

Za asimptotički vektor S_∞ , ukoliko on postoji, dobijamo da je $S_\infty = P S_\infty$, što povratno znači, da su elementi vektora S_∞ direktno proporcionalni onima pre matrične transformacije P . Takvi vektori se nazivaju eigenvektori matrice P (svojtveni, karakteristični vektori, **prim. prev.**), a proporcionalni koeficijenti se nazivaju eigenvrednosti matrice. S toga, S_∞ je eigenvektor matrice P koji odgovara eigenvrednosti matrice jednake 1. Neophodno je naglasiti da asimptotički vektor stanja ne zavisi od inicijalnog vektora stanja (*Bertiaux et al., 2005*).

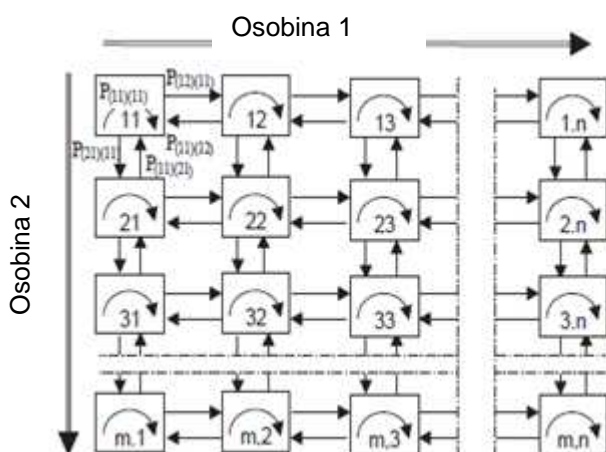
Ako se čestice sa poznatom distribucijom tokom nekog stanja sistema (vektor doziranja S_f) dodaju sistemu nakon svake tranzicije, tranzitivna jednačina (7) postaje:

$$S_{k+1} = P (S_k + S_f) \quad (7)$$

Izvedena procedura data prethodnom jednačinom je uvek stabilna i omogućava praktično izračunavanje svih karakteristika procesa u određenim praškastim sistemima, ukoliko je matrica P poznata (*Ponomarev, 2006*).

Izračunavanje se praktično može veoma lako realizovati putem savremenog softvera MATLAB, a postupak je identičan za mnoge od pitanja vezanih za ovaj problem. Ovo eliminiše problem traženja ili pravljenja modela za tranzitivnu verovatnoću, čime se ostavlja prostor za fokusiranje na fizičku prirodu problema.

Ukoliko se posmatraju dve osobine nekog sistema, može se konstruisati dvodimenzionalni Markovljev niz što se može videti iz primera na slici 11 (Bertiaux et al., 2004; Portillo, 2008):



Slika 11. Šematski prikaz verovatnoća stanja prelaza iz ćelije u ćeliju kod Markovljevog niza

U ovom slučaju, veoma je lako predstaviti stanje sistema kao matricu veličine $m \times n$ (8):

$$S_t = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \dots & S_{1n} \\ S_{21} & S_{22} & \dots & S_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ S_{m1} & S_{m2} & \dots & S_{mn} \end{bmatrix} \quad (8)$$

Koju je neophodno transformisati u vektor kolone (9) zbog matematičke transformacije (8):

$$S = [S_{11}S_{21}\dots S_{m1}S_{12}S_{22}\dots S_{m2}\dots \dots \dots S_{1n}S_{2n}\dots S_{mn}] \quad (9)$$

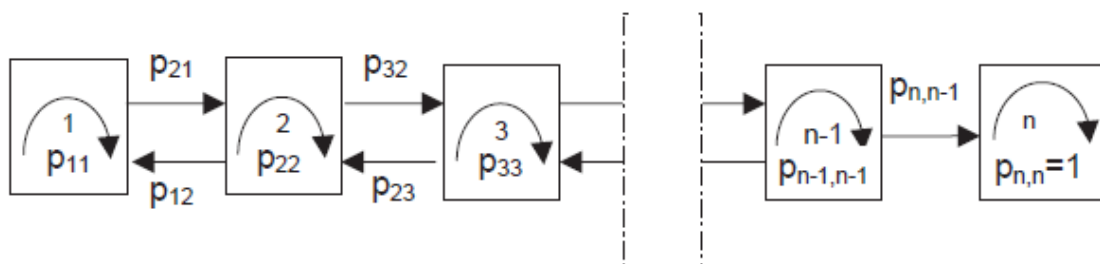
Operacije sa tri ili više osobina čestica čine reprezentaciju uzorka manje vidljivom ali konstrukcija data prethodnom jednačinom ne predstavlja poteškoću kod

izračunavanja. Tranziciona matrica za dvodimenzionalni niz može se jednostavno konstruisati sledeći navedeno:

To je matrica veličine $n \times n$ blokova ili matrica. Njena glavna dijagonala sadrži matrice verovatnoće unutar kolona koje su veličine $m \times m$. Tranzicione matrice za sledeću i prethodnu tranziciju između kolona su smeštene na dijagonalama susednim glavnoj dijagonali (10) (Bertiaux et al., 2005). Na primer:

$$P = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & 0 & \dots & 0 & 0 \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} & \dots & 0 & 0 \\ 0 & P_{32} & P_{33} & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & P_{n-1,n-1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & P_{n,n-1} & P_{nn} \end{bmatrix} \quad (10)$$

Matrica P (10) je napisana brojučano i ma veličinu $mn \times mn$. Svaka kolona matrice P sadrži sve moguće tranzicione verovatnoće za ćeliju ij i njihove sume su jednake 1. Manipulacije sa S i P za multidimenzionalne nizove su potpuno iste kao i za jednodimenzionalni sistem (Slika 12).



Slika 12. Jednodimenzionalni Markovljev niz

Primena Markovljevog niza na simulaciju procesa i analize uglavnom operiše sa dva glavna problema koja se moraju rešiti u svakom pojedinačnom procesu. Prvi je kako izgraditi strukturu niza, a koja najviše odgovara procesu, dok je druga kako definisati tranzicione verovatnoće, koje upravljaju procesom (Dyer and Greenhil, 2000).

2.6.1. Pregled literature u oblasti matematičkog modelovanja mešanja

Statični mikseri za praškaste materijale su modelovani putem Markovljevog niza, još u toku sedamdesetih godina prošlog veka. *Fan et al., 1972*, zatim *Vang i Fan (1976, 1977)* predstavili su stanje sistema kroz nekoliko makrostanja definisanih za hranjenje sistema i kolektora koji su najpre bili umetnuti, a zatim uklonjeni iz kako bi omogućili slobodan protok preškastog materijala. Izabrana je ključna komponenta i matrice tranzicionih verovatnoća u okviru ove komponente koja je praktično povezala sva stanja posle jednog prolaza čestica kroz zonu mešanja. Nakon obnove matrice, bilo je moguće izračunati raspodelu komponenti na dnu za bilo koji broj pasaža, uz pretpostavku linearnosti procesa. Ovaj prvi tzv. "black-box" model važi samo za zonu mešanja i komponentu za koju su dobijeni eksperimentalni podaci. Isti autori su takođe mnogo detaljnije razložili process predstavljajući ukupnu tranzicionu matricu kao proizvod matrica koje se odnose na mnogo manje vremenske korake, gde ove matrice dozvoljavaju prelaz trejsera samo u susedne ćelije (stanja). Međutim, ovaj pristup je rezultirao istom matricom kao u prethodnom radu. Iako ovaj pristup predstavlja vredan pionirski rad, osnovni nedostatak je uopštenost pri formulisanju modela koji ograničava njegovu primenljivost. Pored toga, ovakav pristup ne uzima u obzir segregaciju čestica koja je dešava usled težine čestice pri protoku (*Marikh et al., 2006*).

Kao rezultat rada *Habbache et al., 2002*, napravljen je model aksijalnog mešanja u cilindričnoj mešalici, koristeći pristup Markovljevog niza. Ovaj tip modela je sistemski može se koristiti čak i u odsustvu generalnog pravila. Primenjivan je u literaturi za različite oblasti hemijskog inženjerstva, a posebno za mešanje u statičkim mikserima kao i mikserima sa fluidizovanim kretanjem (*Asmar et al., 2002; Berthiaux et al., 2004; Fan et al., 2009*). Princip ovakvog modela se zasniva na podeli zapremine suda mešalice u nekoliko ćelija (stanja sistema) i ispitivanju prelaza između svake od ovih ćelija u toku određenog vremenskog perioda. Ovo se može izvršiti sukcesivnim uvođenjem trejsera u svako od mogućih stanja (ćelija), a svi ovi podaci se mogu objediniti u formi tranzicione matrice T i vektora stanja $S(n)$ koji odgovara distribuciji trejsera u određenom stanju posle n prelaza.

Generalno, primena teorije Markovljevog niza, ima mnoge prednosti. Pre svega, ona se može smatrati univerzalnom strategijom za stvaranje modela, ne samo za mešanje već i za druge procese hemijske tehnologije (*Bertiaux et. al., 2005*). Stanja sistema se mogu reprezentovati kroz različite fizičke karakteristike procesa. Drugo, elementarne količine su konačne što odgovara stvarnim eksperimentima, jer fizički, uzorci su uvek ograničenih količina. Treće, teorija je veoma vizuelna i ređanjem ćelija i obeležavanjem kretanja materijala strelicama, lako se dolazi do zapisa matrica tranzicionih verovatnoća. Teorija ne zahteva napredne matematičke veštine već samo uključuje umnožavanje matrica i vektora. Ovaj pristup čini teoriju veoma pogodnom za kompjutersku obradu. Što se tiče nedostataka, ova teorija ne omogućava posmatranje unutrašnjeg sistema i onoga što se dešava unutar posmatrane ćelije. Ona ne opisuje ponašanje pojedinačnih čestica i njihovih interakcija. Kao problem prilikom kompjuterske obrade, može se navesti postizanje uslova normalizacije i briga o pozitivnim vrednostima tranzicionih verovatnoća, kod opisivanja nelinearnih fenomena (*Ponomarev, 2006*).

2.7. Određivanje homogenosti preko obeleživača, analizom slike

Za određivanje homogenosti praškastih smeša se koristi više metoda, ali nema dovoljno dostupnih informacija u vezi sa njima (*Eisenberg, 1998; 2008, Barashkov et al., 2006, Đuragić et al., 2009; Corrigan et al., 1994; Clark et al., 2007*). Metode koje se koriste za utvrđivanje efikasnosti mešanja uglavnom imaju neka ograničenja. Većina metoda se zasniva na određivanju sadržaja neke komponente u uzorku, koja je prisutna ili dodata u toku procesa mešanja. Metod za analizu stepena mešanja je prvi primenio Lejls još 50-tih godina prošlog veka (*Lacey, 1943; 1954*)

Određeni broj metoda koje se koriste u tehnologiji praškastih materijala utvrđuje stepen mešanja analizom slike čestica u uzorku smeše uz pomoć mikroskopije, fotografije i / ili video alata (*Realpe et al., 2003; Bertiaux et al., 2006; Koc et al., 2007; Dal Grande et al., 2008*). Slike čestica u dvokomponentnim smešama se mogu se razlikovati po obliku, boji ili nekoj drugoj površinskoj karakteristici. U mnogim slučajevima, za ispitivanje stepena mešanja koriste se

različiti obeleživači koji se dodaju u smeše (*Tae and Kwong, 2004; Corrigan et al., 1998; Clark et al., 2007*)).

Van Puivelde et al. (1999) su razvili novu tehniku za merenje stepena izmešanosti u mešalici sa rotirajućim bubnjem, koristeći analizu slika napravljenih kamerom. Ove slike su konvertovane u bitmap datoteke i analizirane pomoću prilagođenog softvera za crne i narandžaste čestice. Rezultati su pokazali da se ovom tehnikom stepen izmešanosti materijala u rotacionoj mešalici može lako izmeriti i predvideti.

Cilj studije koju su izveli *Koc et al. (2007)* je bio da se razvije i proceni PC tehnika bazirana na kontinualnoj obradi slike za praćenje stepena izmešanosti binarne smeše u realnom vremenu. Crno-bela slika binarne smeše se snima običnom, komercijalnom kamerom. Vrednosti piksela za maksimalan broj pojavljivanja i za svaku sliku u posmatranom intervalu u toku mešanja utvrđuje se i prati tokom vremena, uz pomoć kompjuterskog programa razvijenog u G-programskom jeziku.

U istraživanju *Daumann-a i Nirschl-a (2008)* analiza homogenosti je urađena na bazi fotografija načinjenih na površini smeše različito obojenih čestica, a koje se mogu jasno razlikovati kod mešanja. Preliminarni testovi su pokazali da se ovakav program može koristiti za procenu stepena izmešanosti jer svaka pojedinačna digitalna slika, predstavlja kopiju jednog stanja u određenom vremenu.

Metoda Microtracer® - obojenih čestica gvožđa različitih boja i veličina koje se iz smeše mogu izdvojiti magnetom, koristi se u Sjedinjenim Američkim Državama i nekim evropskim zemljama, u određivanju homogenosti hrane za životinje, već mnogo godina (*Eisenberg, 1998; 2008; Arlet, 2001; Brashkov et al., 2006*). Razlika između napred navedenih metoda i metode sa Microtracer®- ima je u tome što se za određivanje homogenosti koristi filter hartija na koju su prenešene čestice trejsera ekstrahovane iz uzorka i koje nakon razvijanja boje ostavljaju tragove na filter hartiji u vidu tačkica čiji broj zavisi od koncentracije trejsera u uzorku. Čak se i određeni gubici boje zbog abrazije i difuzije u toku određivanja mogu tolerisati, bez uticaja na tačnost te će čak i 20% od formulisane boje i dalje omogućiti čitljive rezultate. Microtracer® je metoda koja veoma dobro može predstaviti veličinu čestica prisutnih u test smeši, naročito onih sa vrlo niskom koncentracijom. Ova vrsta obeleživača se

može izdvojiti iz smeše mnogo brže i efikasnije nego obeleživači koji se izoluju sedimentacijom u perhloretilenu ili nekom drugom rastvaraču. Međutim, nedostatak ove metode je da se odvojene čestice moraju ručno brojati, što zahteva rad i vreme.

3. MATERIJAL I METODE

3.1 Vertikalna mešalica

Za ispitivanja je korišćena vertikalna mešalica, proizvođača "Metalac Ostojić"(slika 13).



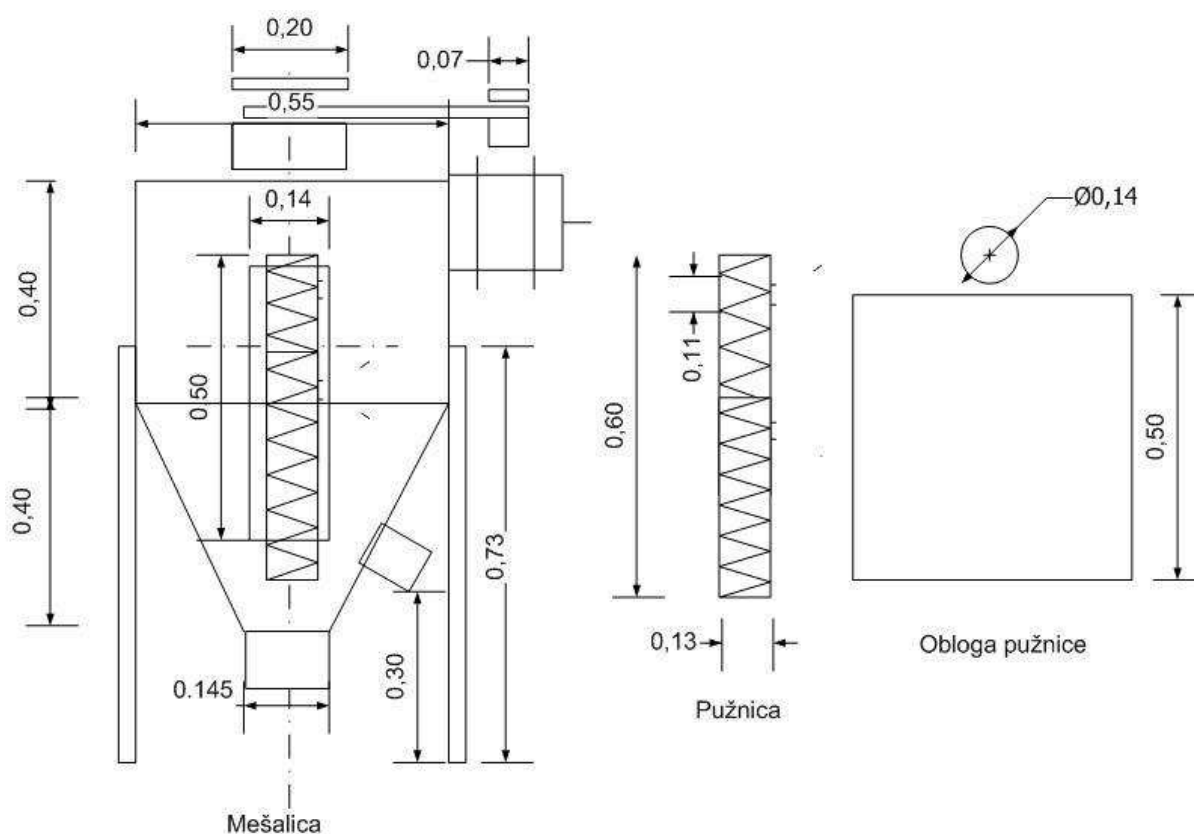
Slika13. Vertikalna mešalica na kojoj su urađena ispitivanja

Mešalica se kao takva proizvodi i prodaje na tržištu i za prvu seriju analiza, njene izvorne karakteristike nisu menjane. Karakteristike mešalice su sledeće:

- kapacitet: 50 kg materijala po šarži
- snaga motora 0.55 kW
- frekvencija: 50 Hz
- broj obrtaja motora: podesiv uz pomoć frekventnog regulatora (0-1390 o/min)
- prečnik pužnice: 13 cm
- korak pužnice: 11 cm
- dužina pužnice: 80 cm
- prečnik obloge pužnice: 14 cm

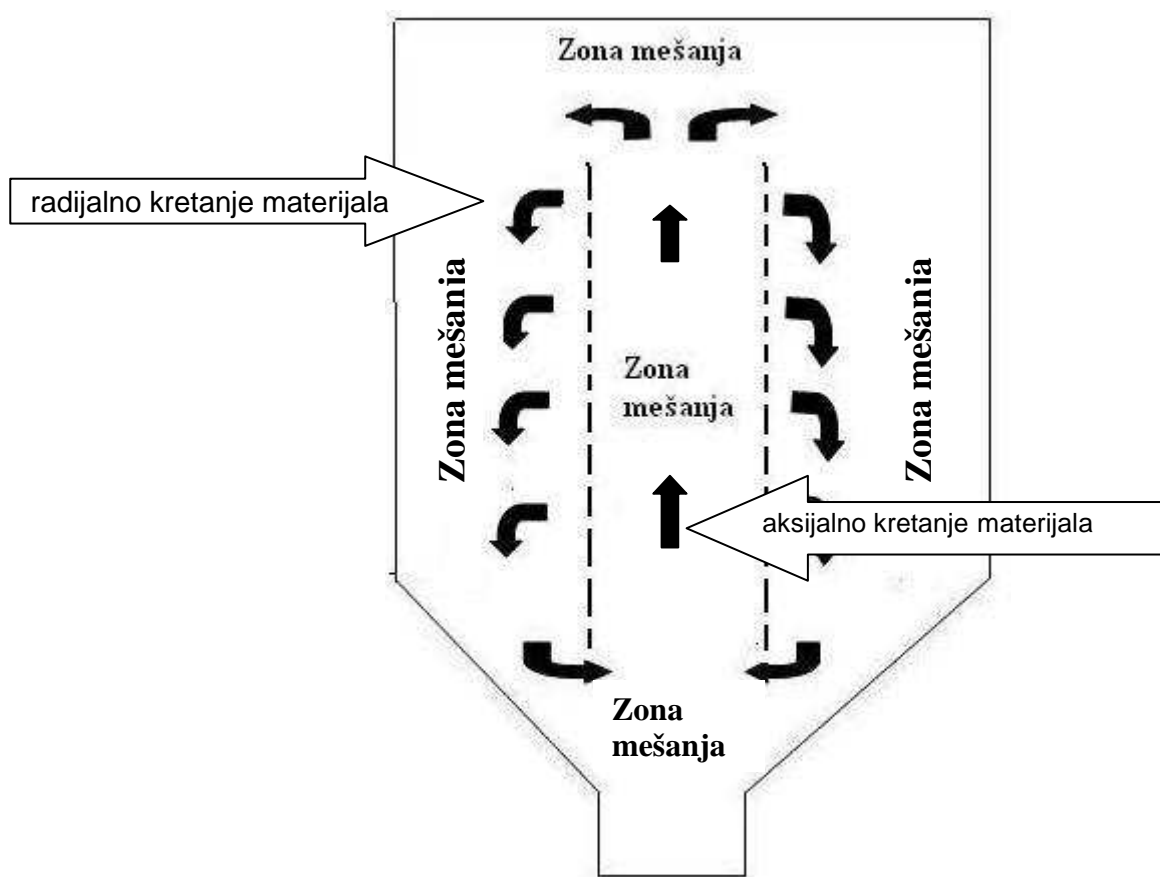
- vreme mešanja: po preporuci proizvođača 7-10 minuta

Šematski prikaz konstrukcije mešalice sa spoljašnjim i unutrašnjim dimenzijama, dat je na slici 14.



Slika 14. Skica vertikalne mešalice sa spoljašnjim i unutrašnjim dimenzijama (dimenzije su izražene u m)

Za potrebe eksperimenta, a u cilju optimizacije procesa mešanja, napravljeno je dodatno još 3 obloge spirale, od perforiranog lima sa otvorima kružnog oblika i prečnika 18 mm, kako bi materijal pri mešanju mogao da prolazi kroz otvore i dodatno se meša. Kod obloge bez perforacija, usled transporta materijala pomoću pužnice, proces mešanja se odvija aksijalnim kretanjem, dok je radijalno kretanje ograničeno i dešava se samo u donjoj i gornjoj zoni mešalice (ulaz i izlaz iz puža). Obloga sa perforacijama omogućava da se materijal kreće i radijalno, celom dužinom pužnice, što sprečava formiranje "mrtvih uglova" u mešalici (slika 15).

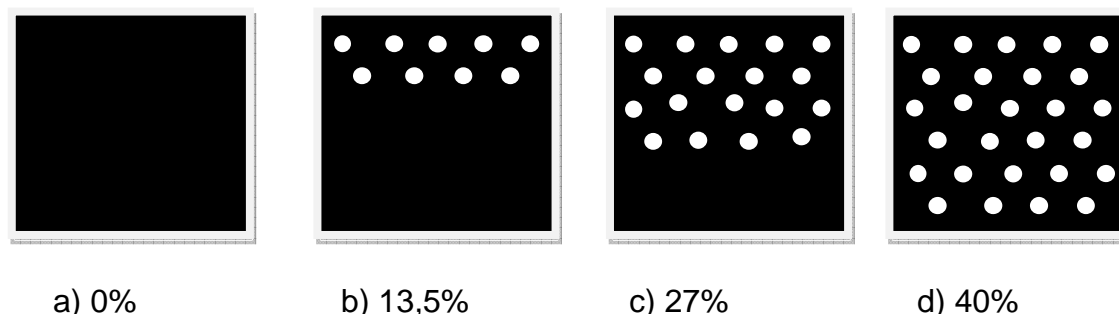


Slika 15. Zone mešanja kod rekonstruisane mešalice

3.1.1 Proračun za obloge pužnice

Ø otvora	1,8 cm
r_{otvora}	0,9 cm
Površina otvora	$r_{\text{otvora}}^2 \pi = (0,9 \text{ cm})^2 \pi = 2,54 \text{ cm}^2$
Površina obloge	50 cm x 44 cm = 2200 cm ²
Broj otvora po površini obloge sa razmakom 7 mm	350 otvora (sa celokupnom perforiranom površinom)
Ukupna površina otvora	350 x 2,54 cm ² = 889 cm ²
Udeo površine sa otvorima	
Udeo ₁	889/2200 x 100 ≈ 40 %
Udeo _{1/3}	296/2200 x 100 ≈ 13.5 %
Udeo _{2/3}	592/2200 x 100 ≈ 27 %

Izgled površine obloge, prikazan je na slici 16 a, b , c i d.



Slika 16. Različiti izgled obloga sa i bez perforacija

Ispitivanje homogenosti je urađeno na samlevenom kukuruzu kao nosaču, sa 3 različita granulometrijska profila. Kukuruz je samleven na mlinu čekićaru, sa izmenom sita od 2, 3 i 4 mm.

Granulometrijski sastav materijala je urađen na Endecott-ovom slogu sita sa automatskom tresilicom, a prema metodi ANSI/ASAE standard S319.3

Nasipna masa materijala je urađena na aparatu prema Bohme-u i prema standardu ASTM C29 / C29M – 09.

Gustina sabijanja materijala je urađena na Engelsman Joint Volumetar uređaju, prema metodi ASTM B527-06.

Vlažnost materijala je po standardnoj metodi za određivanje sadržaja vlage, sušenjem na 105⁰ C u sušnici, do konstantne mase, prema Pravilniku o metodama uzimanja uzoraka i metodama fizičkih, hemijskih i mikrobioloških analiza stočne hrane, (*"Sl. List SFRJ", br. 15/87*)

Homogenost je utvrđena metodom Micrtotracer[®]-a, za odnos mešanja 1:10.000 i 1:100.000 kod svih granulacija nosača i sa izmenom obloga pužnice.

3.2 Cilindrična mešalica

U laboratorijskim uslovima ispitana je i laboratorijska cilindrična mešalica od pleksiglasa, zapremine 5 l (slika 17) kao model za cilindrične mešalice.



Slika 17. Laboratorijska cilindrična mešalica

Mešalice je imala podesiv broj obrtaja, pa su ispitane različite brzine obrtanja. (30 i 50 o/ min). Urađeni su eksperimenti sa različitim nivoom punjenja cilindrične mešalice sa 1 kg, 1.5 kg i 2 kg materijala.

Za izradu matematičkog modela i praćenje kretanja čestica obeleživača unutar mešalice, cilindrična mešalica je podeljena na 11 odeljaka (ćelija), od kojih je svaka reprezentovala 1 uzorak. U laboratorijskim ispitivanjima sa različitim nivoima punjenja mešalice, uzeto je po 10 uzoraka za svaku šaržu.

Urađen je matematički model za ovaj tip mešalice i upoređen sa eksperimentalno dobijenim podacima. Takođe, matematički model je upoređen sa industrijskom mešalicom iste konstrukcije i kapaciteta 50 kg/šarži u pogonu za proizvodnju hrane za životinje.

Sva ispitivanja u laboratoriji na cilindričnoj mešalici su urađena na istom materijalu, kukuruznom brašnu koje se koristi u pivarskoj industriji kao sirovina za

fermentaciju. Kukuruzno brašno je odabrano zbog konstantnosti u granulometrijskom sastavu i osobina protočnosti, koje su u ovom slučaju spadale u grupu slabije protočnih materijala, a sve zbog imitiranja industrijskih uslova koji nisu idealni i kod kojih se protočnost materijala koji se koriste u procesu mešanja, ubraja u grupu srednje protočnih materijala.

Analiza veličine i raspodele veličina čestica je urađena na uređaju HAVER TYLER CPA 2-1, u IFF institutu u Braunšvajgu – Nemačka.

Protočnost je urađena na Jenike Shear Tester uređaju, u laboratoriji Instituta IFF iz Braunšvajga- Nemačka.

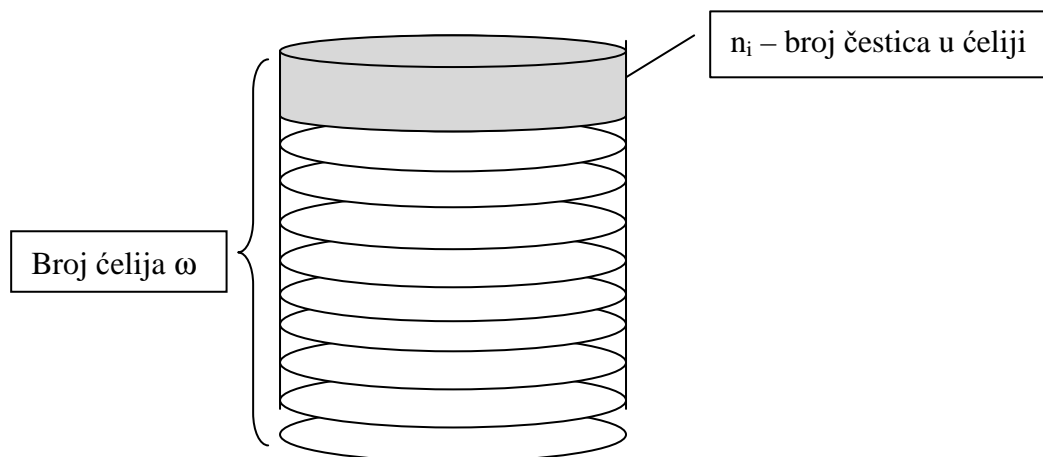
3.3 Hipoteza za Markovljev niz

U ovom istraživanju kao sistem mešanja je uzeta mešalica šaržnog tipa. Važno je napomenuti da za sve serije mešalica ovog tipa (na primer, bubnjaste mešalice i mešalice V-tipa), mešanje se postiže zamenom mesta čestica jedne grupe sa drugom grupom čestica koja se nalazi u mešalici. Tako je pojam "mešalica" i "smeša" potpuno identičan u ovom slučaju i može se podjednako koristiti. To naravno, nije dozvoljeno u slučaju kontinualnog mešanja (*Bertiaux et al., 2004*).

Prema Lai i Fan-u (*Lai and Fan, 1975*), za mešalicu proizvoljne konfiguracije, ceo prostor u mešalici se može podeliti na konačan broj ćelija bilo kog oblika pogodnog za analizu i merenje. Veličina svake ćelije bi trebalo da bude dovoljna da predstavlja prosečne uslove duž celog regiona koji uključuje sve komponente, a ipak dovoljno mali da osigura kontinuitet distribucije čestica. Ovaj uslov je značajan kako bi se pretpostavilo da je koncentracija svake posmatrane komponente unutar ćelije, ravnomerno raspoređena. Veličina i oblik ćelija ne moraju biti jednaki. Na primer, ćelije pored zidova mešalice ne moraju da budu iste veličine i oblika kao one daleko od zidova. Međutim, u ovom slučaju, pretpostavljeno je da su zbog oblika mešalice i lakšeg uzimanja uzoraka, ćelije približno jednake (slika 19). Ako sa ω obeležimo ukupan broj ćelija u mešalici a sa n_i broj posmatranih čestica u ćeliji i , onda sledi da je:

$$\sum_{i=1}^{\omega} n_i = n \quad (11)$$

gde je n ukupan broj čestica u mešalici.



Slika 21. Šematski model podele cilindričnog suda mešalice na ćelije

Pod pretpostavkom da u sistemu ne dolazi do aglomeracije niti usitnjavanja posmatrane komponente, ukupan broj čestica n je konstantan.

Frakcija čestica u ćeliji j , ε_j u određenoj tački posmatranja, koja se može naći u ćeliji k , ε_k nakon konačnog vremena posmatranja (τ), može se opisati tranzicionom verovatnoćom iz stanja E u stanje E_k u jednom tranzicionom koraku (Lai and Fan, 1974):

$$P_{kj}^{(N)} = P_r [X_N = \varepsilon_k \mid X_{N-1} = \varepsilon_j] = p_{k,j} \quad (12)$$

što je zasnovano na pretpostavci da se radi o homogenom Markovom nizu (Ponomarev, 2006).

$p_{k,j}$ su tranzicione verovatnoće koje moraju zadovoljiti uslov:

$$\sum_{k=1}^{\omega} p_{k,j} = 1 \quad 0 \leq p_{k,j} \leq 1 \quad (j, k = 1, 2, \dots, \omega) \quad (13)$$

odnosno, zbir svih tranzicionih verovatnoća u jednom redu ili koloni matrice mora iznositi 1.

Za ispitivanje u ovom radu, uzeta je dvokomponentna (binarna) smeša, nosača (kukuruznog brašna) i trejsera (Microtracer F-blue) koje se razlikuju po boji. Znači, polazi se od pretpostavke da je sistem od dve komponente homogen, odnosno da se čestice razlikuju samo po boji. Ako je broj komponenti sistema r , broj čestica komponente j u ćeliji i m_{ij} , a ukupni broj čestica u ćeliji i n_i , onda je :

$$n_i = \sum_{j=1}^r m_{ij} \quad (i= 1, 2, 3 \dots \omega) \quad (14)$$

Ukupan broj čestica komponente j u mešalici m_j je u korelaciji sa m_{ij} iz čega sledi da je:

$$m_j = \sum_{i=1}^{\omega} m_{ij} \quad (j= 1, 2, 3 \dots r) \quad (15)$$

Ukupan broj čestica u mešalici n je povezan sa prethodnim veličinama na sledeći način:

$$n = \sum_{i=1}^{\omega} n_i = \sum_{i=1}^{\omega} m_j = \sum_{i=1}^{\omega} m_{ij} \quad (16)$$

Ako pretpostavimo teorijski da je mešanje idealno, za očekivati je da će koncentracija svake komponente u mešalici, tj. posmatranim celinama biti jednaka, odnosno da će u trenutku postizanja maksimuma biti u ekvilibrijumu. Konačna ravnotežna koncentracija smeše se može prikazati kao odnos udela čestica posmatrane komponente j u odnosu na ukupan broj čestica te komponente u sistemu, tj. smeši (Lai and Fan, 1974):

$$(C_j)_{\infty} = \frac{m_j}{n} \quad (j= 1, 2, 3 \dots r) \quad (17)$$

Na taj način može da se pretpostavi da će koncentracija bilo koje komponente u smeši takođe dostići ravnotežnu koncentraciju $(C_j)_{\infty}$ u određenom vremenskom intervalu (Habache et al., 2002).

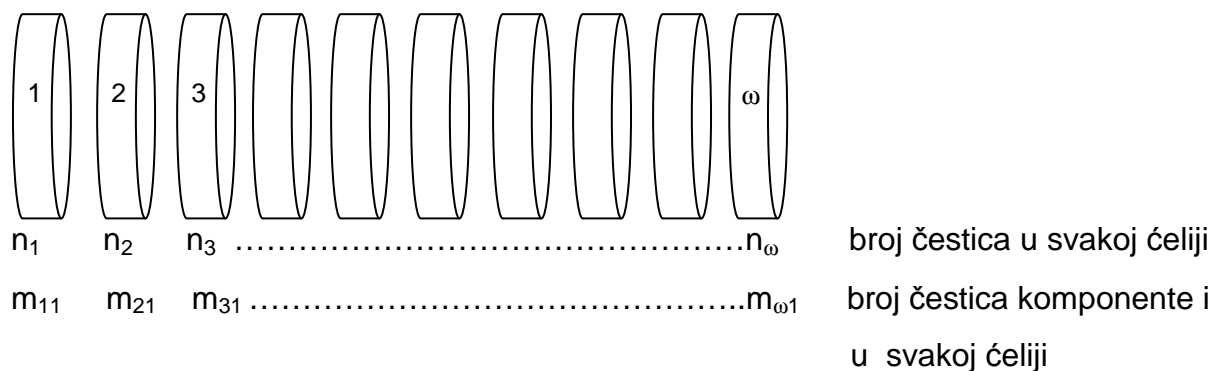
Ako je $C_{kj}(N)$ koncentracija komponente j u ćeliji k u vremenu $t = N\tau$ ($N= 1, 2, 3\dots$) gde je N kumulativni broj operacija mešanja, onda je za nesegregirajuću komponentu r sa homogenim česticama:

$$\lim_{N \rightarrow \infty} C_{kj}^r(N) = (C_j^r)^\alpha \quad (18)$$

($j= 1, 2, 3\dots r$; $k= 1, 2, 3\dots \omega$)

Pod pretpostavkom da je Markov niz prvog reda i da je homogen, može se tvrditi da je broj čestica komponente i koji se kreće iz ćelije j u ćeliju k , $Q_{j \rightarrow k}$, a tokom vremena τ :

$$Q_{j \rightarrow k}(i) = p_{kj} m_{ji} \quad \text{za uslov } i = 1, 2, 3\dots r; k \neq j; j= 1, 2, 3\dots \omega \quad (19)$$



Ukupan broj čestica u svakoj ćeliji: $n_1 = \sum_{i=1}^r m_{ij} \quad n_2 \quad n_3 \quad \dots \quad n_r \quad (20)$

3.4 Prikaz matrice za proces mešanja u cilindričnoj mešalici

Poređenjem literaturnih navoda iz ove problematike (Lai and Fan, 1974; Bertiaux and Mizonov, 2004; Ponomarev, 2006; Ponomarev et al., 2009; Habache et al., 2002), sačinjena je matrica tranzicionih verovatnoća. Pošlo se od pretpostavke da se transport čestica trejsera u aksijalnom pravcu odvija tako da one prelaze samo u narednu ćeliju i još jednu posle nje, prilikom obrtanja mešalice, matrica tranzicionih verovatnoća dobija sledeći izgled (slika 19):

$$T_{1/2} = \begin{bmatrix} p & (1-p)*r & (1-p)*(1-r) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & p & (1-p)*r & (1-p)*(1-r) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & p & (1-p)*r & (1-p)*(1-r) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & p & (1-p)*r & (1-p)*(1-r) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & p & (1-p)*r & (1-p)*(1-r) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p & (1-p)*r & (1-p)*(1-r) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p & (1-p)*r & (1-p)*(1-r) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p & (1-p)*r & (1-p)*(1-r) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p & (1-p)*r & (1-p)*(1-r) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p & 1-p \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

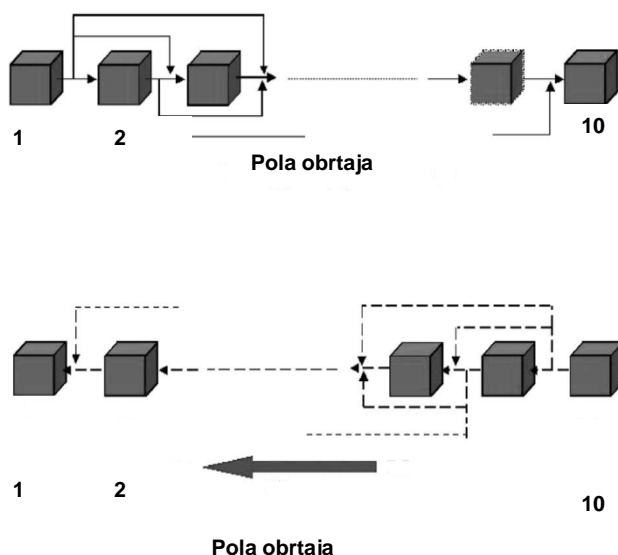
Slika 19. Izgled matrice tranzicionih verovatnoća kod cilindrične mešalice

Gde su parametri:

p – verovatnoća da će čestica ostati u ćeliji

r – verovatnoća da će preći u susednu ćeliju

Obzirom da je mešalica takve konstrukcije, da se prilikom obrtanja na pola obrtaja cilindra dešava praktično proces definisan gore navedenom matricom, neophodno je tranzicionoj matrici pridodati još jednu koja se dobija rotiranjem postojeće za 180° . Ovakav proizvod dve matrice definiše 1 pun obrtaj cilindra mešalice. Šematski, to se može prikazati na sledeći način (slika 20):



Slika 20. Šematski prikaz obrtanja cilindra i prelaza čestica iz jedne ćelije u drugu

3.5 Metoda za određivanje homogenosti sa Microtracer-ima

Homogenost je merena metodom Microtracer[®]-a za različite odnose mešanja (1:10.000 i 1:100.000), a kvantitativno je izražena preko verovatnoće P (probability) i koeficijenta varijacije Cv.

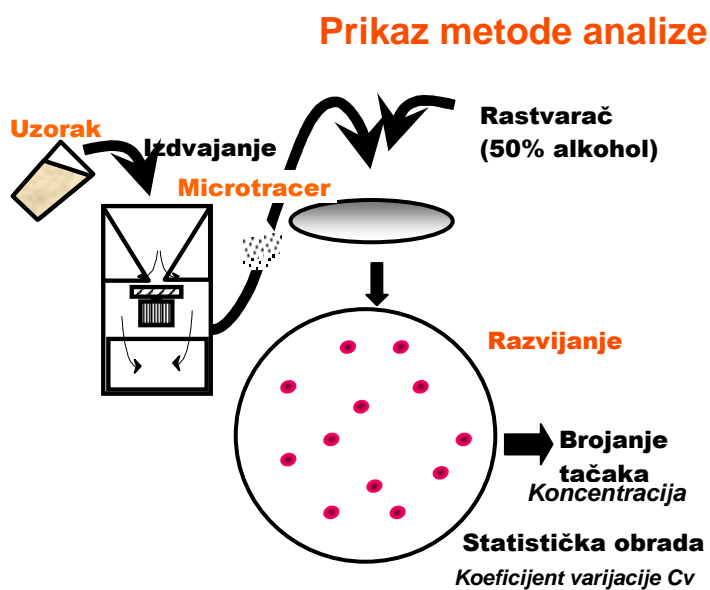
Proces umešavanja komponenata je simuliran dodavanjem obeleživača koji služe kao indikatori homogenosti. Upotrebljeni su obeleživači »Microtracer« na bazi obojenih čestica gvožđa proizvođača Micro Tracers, Inc., San Francisco, USA. To su proizvodi sa tačno definisanom veličinom i brojem čestica po gramu u različitim bojama.

Iz uzoraka koji se analiziraju, prethodno umešane čestice Microtracer-a se izdvajaju pomoću aparata "Rotary detector", odnosno magnetnog separatora.

Izdvojeni obeleživači se sa filter papira se prebacuju u posudicu za merenje,

demagnetizuju, odvoje od eventualno drugih primesa i pažljivo prenose na filter papir E&K Scientific No.6010-1850, prečnika 18,5 cm koji je prethodno navlažen 50% vodenim rastvorom alkohola. Filter papir se zatim osuši na zagrejanom ploči

Na osušenom papiru se jasno mogu uočiti obojene tačkice tj. čestice obeleživača "Microtracer"-a. Sve čestice-tačkice se izbroje i dobijeni brojevi predstavljaju koncentraciju "Microtracer"-a u uzorku (slika 21) .

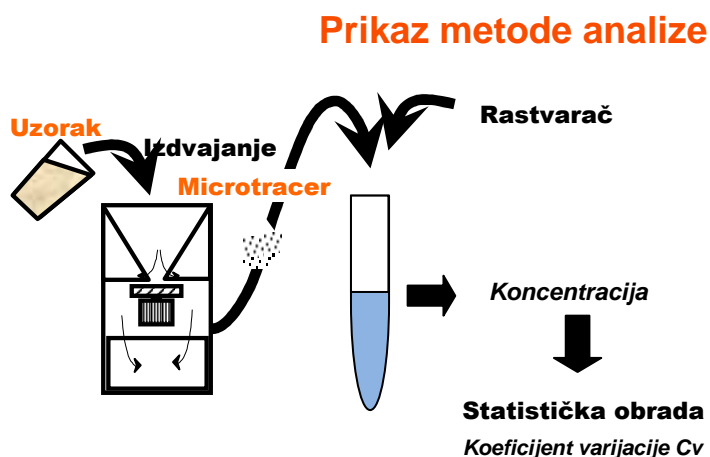


Slika 21. Prikaz metode Microtracer[®] sa brojanjem tačkica

Svaki od *Microtracer* indikatora ima deklarisan broj čestica po gramu, pa se na osnovu toga može izračunati očekivani broj čestica u uzorku. Za *Microtracer*-e iz RF grupe broj čestica po gramu iznosi >1.000.000.

Postupak analize homogenosti sa tačkicama, nešto se razlikuje od postupka kada je u pitanju spektrofotometrijska metoda. U smešu se dodaje obeleživač sa daleko većim brojem čestica po gramu (preko 1 milion), a analiza sadržaja se radi spektrofotometrijski. Postupak izdvajanja čestica iz uzorka je isti kao i kod brojanja tačkica (na Rotary detektoru) ali se boja sa izdvojenih čestica, rastvara u rastvaraču (u ovom slučaju 7% Na₂CO₃) i očitava na spektrofotometru. Talasna dužina na kojoj su očitane vrednosti absorbancije je iznosila 630 nm. Statistička analiza rezultata je

takođe drugačija i rezultati se tretiraju kao normalna distribucija, gde se homogenost izražava preko standardne devijacije i koeficijenta varijacije (slika 22).



Slika 22. Prikaz metode Microtracer[®] sa spektrofotometrijskim određivanjem koncentracije

Izračunavanje vrednosti iz matematičkog modela je urađeno u programu MATLAB, a rezultati su upoređeni i statistički obrađeni pomoću programa STATISTICA V 9.0 (Statistica, 2009).

3.6 Ispitivanje programa za brojanje tačkica Microtracera

Uporedo sa izradom matematičkog modela, urađena su ispitivanja računarskog programa Megatracer[®] koji je prethodno razvijen u saradnji sa Departmanom za automatiku, Fakulteta tehničkih nauka u Novom Sadu, kojim se skraćuje vreme brojanja čestica Microtracer-a nakon analize homogenosti smeše. Metodom analize slike, uporedo je urađeno brojanje tačkica ručno i pomoću programa.

Kod ispitivanja softvera za brojanje tačkica, svi eksperimenti mešanja su urađeni u maloj, cilindričnoj mešalici od pleksiglasa, zapremine 5 l. Ispitivanja su vršena na 3 šarže. Vreme mešanja je iznosilo 10 minuta za sve šarže, kao i broj obrtaja cilindra mešalice (50 o/min). Mase šarži su bile 1,0, 1,5 i 2,0 kg, a kao

nosač je upotrebljeno fino samleveno kukuruzno brašno. Microtracer® F crvene boje, sa prosekom od 25.000 čestica po gramu, je dodat u koncentraciji od 0,05 g po kg materijala. Nakon mešanja, uzeto je po 20 uzoraka iz svake šarže. Masa uzoraka je iznosila 50, 75, 100 g. Čestice Microtracer®-a su uz pomoć Rotari detektora® (model 99 - proizvođač Microtracers® INC, San Francisko), prenešene na filter papir i navlažene sa 50% vodenim rastvorom alkohola koji je upotrebljen za razvijanje boje. Filter papir je osušen na zagrejanoj ploči, a nakon toga su filter papiri sa obojenim tačkicama skenirani na skeneru (HP 3800) u BMP formatu, sa rezolucijom 150x150 dpi. Skenirane slike su importovane u PC softverski program Megatracer® i obrađene. Broj tačkica je određen i ručnim brojanjem i rezultati obe metode su upoređeni. Rezultati su obrađeni pomoću statističkog programa Statistica V. 9.0. (Statistica, 2009)

4. REZULTATI I DISKUSIJA

4.1. Rezultati ispitivanja nosača (samlevenog kukuruza) upotrebljenog za testove u vertikalnoj mešalici

4.1.1 Sadržaj vode

Tabela 4. Sadržaj vode u kukuruzu samlevenom na mlinu čekićaru sa različitim otvorima sita

	Otvor na situ čekićara		
	2 mm	3 mm	4 mm
Sadržaj vode* (%)	11.13	11.05	12.1

* Vrednosti su izražene kao srednja vrednost 3 merenja

Vrednosti sadržaja vode prikazane u tabeli 4 se kreću u granicama predviđenim Pravilnikom o kvalitetu hrane za životinje (*Sl. list RS, 4/2010*), član 8. kojim se definiše sadržaj vode u kukuruzu kao sirovini za hranu za životinje (maksimalno dozvoljen nivo 14%). Takođe, ove vrednosti su, prema istom Pravilniku, u okviru granica predviđenih za smeše za ishranu životinja (12 – 13.5%).

4.1.2 Granulacija i protočne karakteristike kukuruza

Rezultati ispitivanja granulometrijskog sastava kukuruza samlevenog na mlinu čekićaru, koji je upotrebljen za testove na vertikalnoj mešalici, prikazani su u tabelama 5, 6 i 7.

Tabela 5. Granulometrijski profil kukuruza samlevenog na mlinu čekićaru sa otvorom sita 4 mm

Otvor na situ (μm)	Ostatak na situ (gr)	Ostatak na situ (%)	log(d)	m*log(d)
dno	0.00	0.00		0.00
63	1.94	1.94	1.80	3.49
125	7.76	7.76	2.10	16.27
250	19.78	19.78	2.40	47.43
630	8.36	8.36	2.80	23.40
800	6.50	6.50	2.90	18.87
1000	10.66	10.66	3.00	31.98
1250	30.04	30.05	3.10	93.03
2000	12.96	12.96	3.30	42.78
2500	1.98	1.98	3.40	6.73
ukupno	99.98	100.00		283.99
Geometrijski prečnik (μm)				692.53

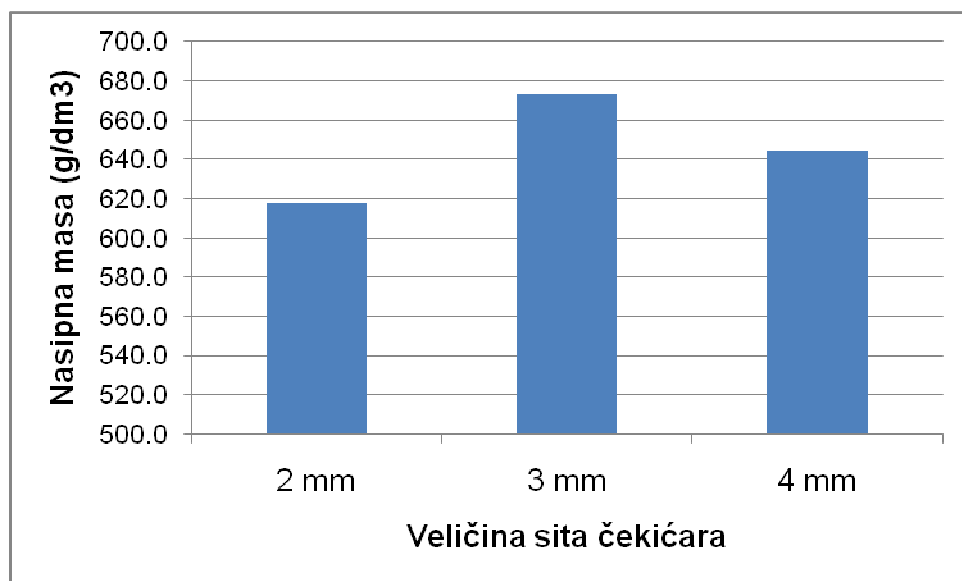
Tabela 6. Granulometrijski profil kukuruza samlevenog na mlinu čekićaru sa otvorom sita 3 mm

Otvor na situ (μm)	Ostatak na situ (gr)	Ostatak na situ (%)	log(d)	m*log(d)
dno	0.00	0.00		
63	0.40	0.40	1.80	0.72
125	7.02	7.01	2.10	14.72
250	26.50	26.47	2.40	63.55
630	10.00	9.99	2.80	27.99
800	6.00	5.99	2.90	17.42
1000	14.68	14.67	3.00	44.04
1250	30.12	30.09	3.10	93.28
2000	5.00	5.00	3.30	16.51
2500	0.38	0.38	3.40	1.29
	100.10	100.00		279.51
Geometrijski prečnik (μm)				619.92

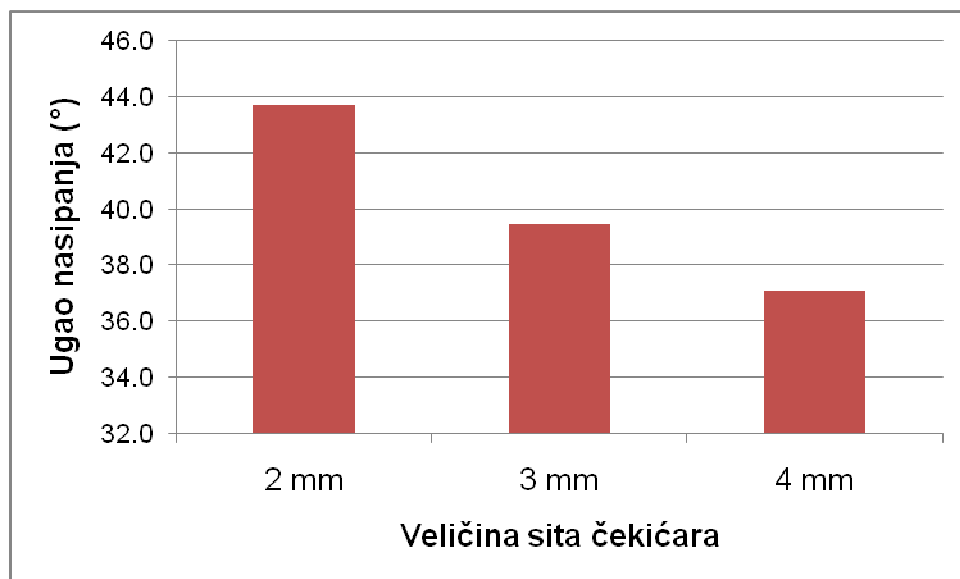
Tabela 7. Granulometrijski profil kukuruza samlevenog na mlinu čekićaru sa otvorom sita 2 mm

Otvor na situ (μm)	Ostatak na situ (gr)	Ostatak na situ (%)	log(d)	$m \cdot \log(d)$
dno	0.00	0.00		
63	0.22	0.22	1.80	0.40
125	4.46	4.50	2.10	9.35
250	42.00	42.34	2.40	100.71
630	14.22	14.33	2.80	39.81
800	8.58	8.65	2.90	24.91
1000	19.02	19.17	3.00	57.06
1250	9.38	9.46	3.10	29.05
2000	1.12	1.13	3.30	3.70
2500	0.20	0.20	3.40	0.68
	99.20	100.00		265.66
Geometrijski prečnik (μm)				476.49

Kukuruz samleven na čekićaru sa sitima 3 i 4 mm ima sličan granulometrijski profil, sa geometrijskim prečnikom čestica 692 μm , odnosno 619 μm , za razliku od kukuruza samlevenom na situ 2 mm sa geometrijskim prečnikom 476 μm i evidentnim udelom čestica veličine ispod 600 μm (više od 60%). Ovakav granulometrijski profil je uticao i na ostale karakteristike kao što su nasipna masa i protočnost materijala. (slike 23 i 24)



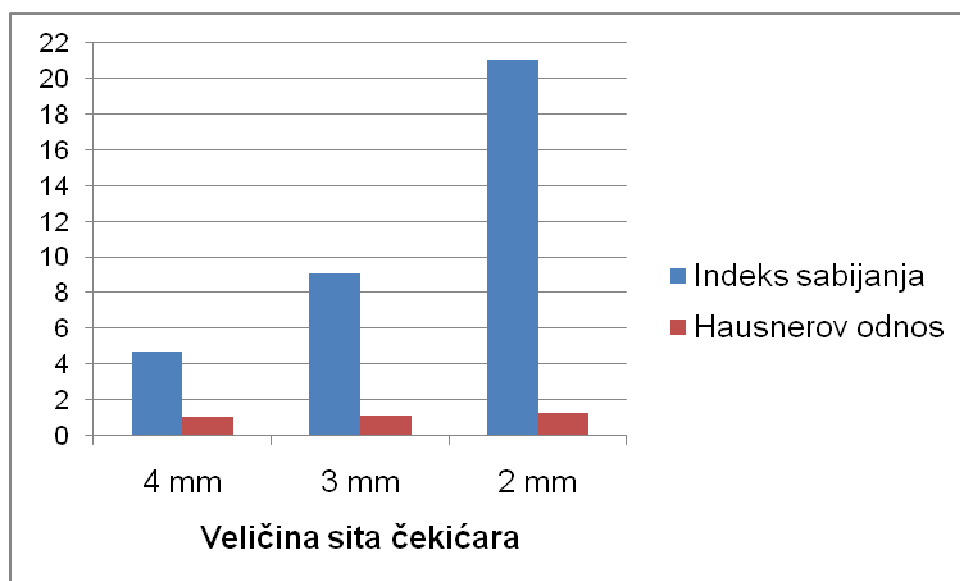
Slika 23. Nasipna masa kukuruza samlevenog na različitim sitima



Slika 24. Ugao nasipanja kukuruza samlevenog na različitim sitima

Zbog prisustva sitnih čestica, kukuruz samleven na situ 2 mm imao je najmanju nasipnu masu (617.7 g/dm^3) i najlošije protočne karakteristike koje ga svrstavaju u kategoriju slabo protočnih ili kohezivnih materijala (ugao nasipanja $42\text{--}45^\circ$). Materijal samleven na situ 3 i 4 mm je pokazao bolje protočne osobine, a najkрупnija granulacija samlevenog kukuruza je imala i najmanji ugao nasipanja (37.1°).

Nakon određivanja mase sabijanja utvrđena su još dva parametra koja ukazuju na protočnost materijala. Vrednosti indeksa sabijanja (21.05) i Hausnerov odnos (1.26) su potvrdili da se kod kukuruza samlevenog na čekičaru sa sitom 2 mm, radi o slabo protočnom materijalu. (slika 25)



Slika 25. Zavisnost indeksa sabijanja i Hausnerov odnos za kukuruz samleven na različitim sitima

Osobine kukuruza samlevenog na situ 2 mm, uticale su na to da je bilo nemoguće uraditi eksperiment sa ovim materijalom jer je došlo do zasvođavanja unutar mešalice, a materijal se nije pokretao čak ni kod povećavanja broja obrtaja motora, pa su eksperimenti urađeni samo sa kukuruzom samlevenim na situ 3 i 4 mm.

4.2 Rezultati ispitivanja homogenosti kod originalne konstrukcije mešalice

4.2.1 Rezultati za odnos mešanja 1:10.000

U originalnoj konstrukciji mešalice, obloga puža je bila bez perforacija i najintenzivnije mešanje materijala se odvijalo u donjim i gornjim zonama mešalice. Prema preporuci proizvođača, vreme mešanja za ovu mešalicu iznosi 7-10 minuta. Rezultati ispitivanja homogenosti za vreme mešanja od 6, 8, 10 i 12 minuta sa spektrofotometrijskim određivanjem sadržaja Microtracer-a i granulacijom kukuruza samlevenom na situ 4 mm, dati su u tabeli 8.

Tabela 8. Rezultati ispitivanja homogenosti u mešalici sa punom oblogom, za odnos mešanja 1:10.000 i kukuruz granulacije 4 mm

Broj Uzorka	Apsorbancija*			
	6 min	8 min	10 min	12 min
1	0.5731	0.4996	0.5408	0.5860
2	0.6219	0.4459	0.5426	0.5449
3	0.5550	0.4648	0.6058	0.5540
4	0.5724	0.5584	0.4169	0.4980
5	0.5491	0.5142	0.4508	0.5870
6	0.3947	0.5401	0.5182	0.5000
7	0.4642	0.3517	0.5031	0.4415
8	0.4450	0.4809	0.5204	0.5221
9	0.6020	0.4699	0.4364	0.4541
10	0.4805	0.4017	0.5175	0.5340
Srednja vrednost, \bar{x}	0.521	0.473	0.505	0.522
Standardna devijacija, σ	0.07	0.06	0.06	0.05
Koeficijent varijacije, CV (%)	14.4	13.2	11.2	9.5

*Rezultati su izraženi kao srednja vrednost 3 ponavljanja

I pored preporuka proizvođača, za vreme od 10 minuta nije došlo do postizanja homogenosti u mešalici (CV=11.2%). Sa produženjem vremena mešanja za još dve minute, postignuta je homogenost u mešalici, sa koeficijentom varijacije 9.5%, što je u skladu sa rezultatima drugih autora (*Behnke et al., 1992; Đuragić et al., 2008*)

Sa kukuruzom samlevenim na situ od 3 mm i za ista vremena mešanja su dobijeni rezultati prikazani u tabeli 9.

Tabela 9. Rezultati ispitivanja homogenosti u mešalici sa punom oblogom, za odnos mešanja 1:10.000 i kukuruz granulacije 4 mm

Broj Uzorka	Apsorbancija			
	6 min	8 min	10 min	12 min
1	0.5963	0.5989	0.4852	0.5503
2	0.6663	0.4151	0.4549	0.4350
3	0.3632	0.4709	0.5197	0.4212
4	0.5523	0.4591	0.4562	0.4519
5	0.6443	0.5094	0.4526	0.4448
6	0.6108	0.4805	0.4800	0.4450
7	0.6326	0.4389	0.4449	0.5079
8	0.6037	0.4607	0.4802	0.4208
9	0.6266	0.4515	0.4568	0.4929
10	0.5091	0.3589	0.6384	0.5350
Srednja vrednost, \bar{x}	0.579	0.464	0.487	0.470
Standardna devijacija, σ	0.09	0.06	0.06	0.05
Koeficijent varijacije, CV (%)	15.4	13.4	11.8	10.1

Nešto lošiji rezultati su postignuti kod granulacije 3 mm, zbog lošijih protočnih osobina gde je prilikom mešanja na momente dolazilo do zastoja materijala i zasvođavanja unutar mešalice. Prema podacima iz literature (Kurjak, 2005) kapacitet pužnice vertikalne mešalice u velikoj meri zavisi od protočnosti materijala, odnosno njegove kohezivnosti i manji je za materijale finije strukture (kohezivne). Grublja struktura samlevenog kukuruza je dovela do postizanja homogenosti za kraće vreme, nego kod finije granulacije zbog činjenice da krupnije čestice imaju veću brzinu kretanja i lakše menjaju svoju poziciju (Obregon et al., 2010). Iz tog razloga, kod granulacije kukuruza od 2 mm nije bilo moguće izvesti eksperiment zbog stalnog zasvođavanja materijala. Pokušaji da se promenom brzine obrtaja motora poboljša mešanje nisu dali rezultate, a i potrošnja energije sa većim obrtajem motora je bila znatno veća, te se odustalo od daljih eksperimenata sa kukuruzom ove granulacije.

4.2.2 Rezultati za odnos mešanja 1:100.000

Iako se vertikalne mešalice u praksi najčešće koriste za pravljenje smeša sa većim udelom komponenata (odnos mešanja do 1:10.000), pokušalo se utvrditi da li je moguće u ovakvoj mešalici postići odnos mešanja 1:100.000. Vreme mešanja je produženo za još 3 minute, pa je najduže vreme mešanja iznosilo 15 minuta.

Sa kukuruzom granulacije 4 mm, dobijeni su rezultati prikazani u tabeli 10.

Tabela 10. Rezultati ispitivanja homogenosti u mešalici sa punom oblogom, za odnos mešanja 1:100.000 i kukuruz granulacije 4 mm

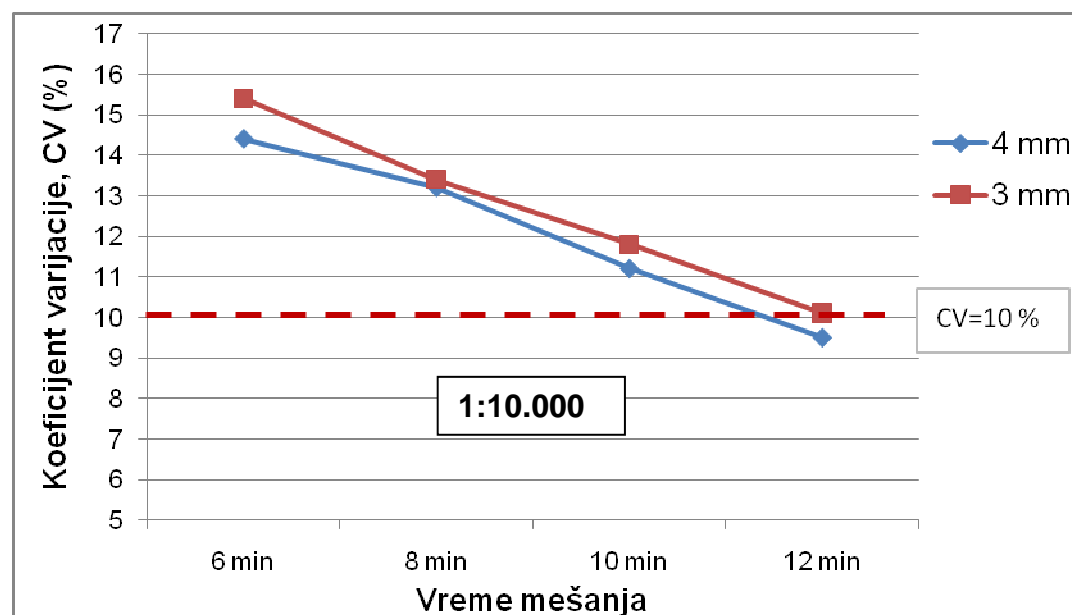
Broj Uzorka	Apsorbancija			
	6 min	8 min	10 min	15 min
1	0.2555	0.2744	0.3222	0.2452
2	0.2963	0.2331	0.2840	0.2209
3	0.2749	0.2489	0.2777	0.2275
4	0.2533	0.2204	0.2509	0.2457
5	0.3727	0.2987	0.2580	0.2969
6	0.3332	0.3035	0.2198	0.2799
7	0.2892	0.3340	0.2588	0.2751
8	0.2455	0.3268	0.2825	0.2582
9	0.2383	0.2513	0.2941	0.2612
10	0.3697	0.2822	0.3351	0.2675
Srednja vrednost, \bar{x}	0.297	0.278	0.273	0.258
Standardna devijacija, σ	0,05	0.04	0.03	0.02
Koeficijent varijacije, CV (%)	16.8	14.0	12.4	9.1

Iz rezultata prikazanih u tabeli 10, može se videti da dolazi do smanjenja koeficijenta varijacije sa produženjem vremena mešanja ali je čak i posle 15 minuta mešanja moguće samo postići koeficijent varijacije oko 10% (9.1%), što je nedovoljno za odnos mešanja 1:100.000. Daljim produženjem mešanja, postavilo bi se pitanje ekonomske opravdanosti ovakvog procesa, pa se nameće zaključak da sa ovakvom konstrukcijom mešalice nije moguće postići zadovoljavajući nivo homogenosti. Slični ali nešto lošiji rezultati su postignuti i sa granulacijom kukuruza od 3 mm (tabela 11). Iako je kod proizvodnje smeša sa malim udelima komponenti neophodno postići veličinu čestica nosača ispod 500 μm , zbog problema protočnosti ovakvih materijala daleko širu primenu imaju brze, horizontalne mešalice i vertikalne mešalice se uglavnom ne koriste (Behnke, 2001; Henderich, 2000).

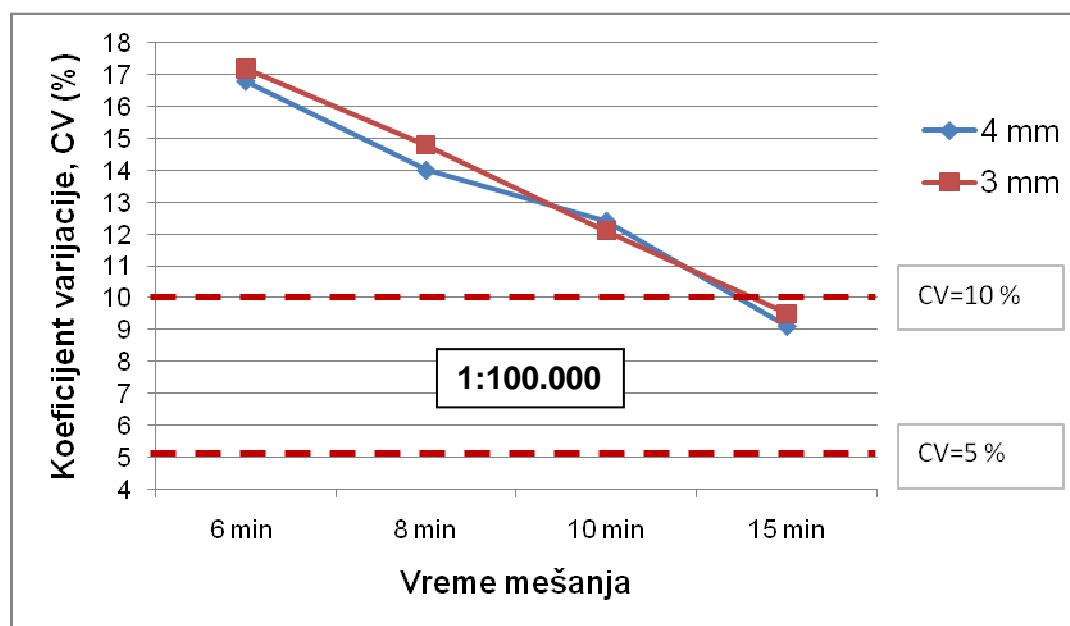
Tabela 11. Rezultati ispitivanja homogenosti u mešalici sa punom oblogom, za odnos mešanja 1:100.000 i kukuruz granulacije 3 mm

Broj Uzorka	Apsorbancija			
	6 min	8 min	10 min	15 min
1	0.2496	0.2510	0.3670	0.3110
2	0.2964	0.2387	0.3092	0.2549
3	0.2554	0.2415	0.3278	0.2454
4	0.2797	0.2240	0.3086	0.2311
5	0.3509	0.3080	0.3712	0.2764
6	0.3775	0.3151	0.2516	0.2646
7	0.2713	0.3111	0.2916	0.2999
8	0.2532	0.3037	0.2968	0.2428
9	0.2558	0.2310	0.2907	0.2760
10	0.3766	0.2240	0.3490	0.2812
Srednja vrednost, \bar{x}	0.302	0.266	0.311	0.268
Standardna devijacija, σ	0.05	0.04	0.04	0.03
Koeficijent varijacije, CV (%)	17.2	14.8	12.1	9.5

Zavisnost odnosa mešanja, granulacije i vremena mešanja je data na slici 26 a i 26 b.



a)



b)

Slika 26. Zavisnost vremena mešanja od granulacije i odnosa mešanja kod obloge bez perforacija (a, b)

4.3 Rezultati ispitivanja homogenosti kod obloge sa 13.5 % perforacija

Puna obloga pužnice, zamenjena je sa oblogom čiji je procenat perforacija iznosio 13.5 %. Ovaj procenat je dobijen tako što je 1/3 površine obloge zamenjena sa perforiranim limom. Rezultati ispitivanja mešanja kod granulacije 4 mm i za odnos mešanja 1:10.000, prikazani su u tabeli 12.

Tabela 12. Rezultati ispitivanja homogenosti u mešalici sa oblogom sa 13.5 % perforacija, za odnos mešanja 1:10.000 i kukuruz granulacije 4 mm

Broj Uzorka	Apsorbancija			
	6 min	8 min	10 min	12 min
1	0.6007	0.4812	0.6640	0.5270
2	0.6814	0.6149	0.6558	0.5300
3	0.6794	0.6003	0.6596	0.5540
4	0.6740	0.7005	0.6182	0.5460
5	0.6561	0.6396	0.7212	0.5970
6	0.5265	0.6153	0.6252	0.6056
7	0.5996	0.5721	0.6404	0.6220
8	0.6809	0.5580	0.5690	0.5880
9	0.4579	0.6579	0.5613	0.5740
10	0.5818	0.6636	0.5221	0.4870
Srednja vrednost, \bar{x}	0.615	0.610	0.624	0.563
Standardna devijacija, σ	0.08	0.06	0.06	0.04
Koeficijent varijacije, CV (%)	12.4	10.2	9.4	7.4

Sa ubacivanjem perforacija u oblogu, došlo je do skraćivanja vremena mešanja koje je potrebno kako bi se postigla homogenost. Umesto 12 minuta, koliko je trebalo da se postigne homogenost u originalnoj mešalici, ona je postignuta za 10 minuta (CV=9.4%). Sa daljim produženjem mešanja, koeficijent varijacije se smanjivao i dostigao vrednost 7.4%. Slični rezultati su postignuti i sa granulacijom od 3 mm (tabela 13). Vrednosti koeficijenta varijacije su bile nešto veće za 6, 8 i 12 minuta ali je postignuta homogenost za isto vreme i sa istim koeficijentom varijacije (9.4%). Izraženo u procentima, vreme mešanja je skraćeno za nešto više od 15%, odnosno za 1/6 od ukupnog vremena mešanja.

Tabela 13. Rezultati ispitivanja homogenosti u mešalici sa oblogom sa 13.5 % perforacija, za odnos mešanja 1:10.000 i kukuruz granulacije 3 mm

Broj Uzorka	Apsorbancija			
	6 min	8 min	10 min	12 min
1	0.3940	0.4295	0.5257	0.4393
2	0.4295	0.5320	0.4494	0.5036
3	0.4593	0.3742	0.4637	0.4468
4	0.3630	0.5275	0.5321	0.5220
5	0.3820	0.4190	0.4821	0.4857
6	0.4929	0.5284	0.4164	0.4820
7	0.3674	0.4591	0.4859	0.5620
8	0.4186	0.4328	0.4685	0.4870
9	0.4678	0.5213	0.4710	0.4492
10	0.5271	0.4658	0.5754	0.5243
Srednja vrednost, \bar{x}	0.434	0.469	0.487	0.490
Standardna devijacija, σ	0.06	0.06	0.05	0.04
Koeficijent varijacije, CV (%)	12.8	11.9	9.4	8.0

Nakon ispitivanja homogenosti za odnos mešanja 1:100.000, dobijeni rezultati su ukazali na poboljšanje mešanja ali ni sa produženjem vremena na 15 minuta, nije postignuta zadovoljavajuća homogenost. Rezultati za granulaciju 4 mm su prikazani u tabeli 14.

Tabela 14. Rezultati ispitivanja homogenosti u mešalici sa oblogom sa 13.5 % perforacija, za odnos mešanja 1:100.000 i kukuruz granulacije 4 mm

Broj Uzorka	Apsorbancija			
	6 min	8 min	10 min	15 min
1	0.2610	0.2890	0.2020	0.2280
2	0.3071	0.3391	0.2387	0.2799
3	0.2385	0.3141	0.2620	0.2789
4	0.2604	0.2527	0.2512	0.2535
5	0.2857	0.3076	0.2726	0.2792
6	0.3270	0.3291	0.2279	0.2824
7	0.3474	0.3361	0.2800	0.2499
8	0.2648	0.3360	0.2970	0.2509
9	0.2461	0.2315	0.2239	0.2319
10	0.3716	0.2760	0.2332	0.2257
Srednja vrednost, \bar{x}	0.294	0.302	0.254	0.256
Standardna devijacija, σ	0.05	0.04	0.03	0.02
Koeficijent varijacije, CV (%)	15.4	12.5	11.5	8.9

Tabela 15. Rezultati ispitivanja homogenosti u mešalici sa oblogom sa 13.5 % perforacija, za odnos mešanja 1:100.000 i kukuruz granulacije 3 mm

Broj Uzorka	Apsorbancija			
	6 min	8 min	10 min	15 min
1	0.2682	0.2727	0.3146	0.2727
2	0.3329	0.2199	0.3278	0.2600
3	0.2410	0.2374	0.3933	0.2613
4	0.2348	0.2359	0.2516	0.2107
5	0.3536	0.2918	0.2916	0.2803
6	0.3571	0.3392	0.3339	0.2970
7	0.2522	0.3074	0.2968	0.2844
8	0.2836	0.2559	0.3086	0.2586
9	0.2538	0.2611	0.2907	0.2425
10	0.2881	0.2899	0.3092	0.2512
Srednja vrednost, \bar{x}	0.289	0.271	0.312	0.262
Standardna devijacija, σ	0.05	0.04	0.04	0.02
Koeficijent varijacije, CV (%)	15.9	13.5	11.8	9.3

4.4 Rezultati ispitivanja homogenosti kod obloge sa 27 % perforacija

Nakon što je 2/3 obloge (27%) zamenjeno sa perforiranim limom, dobijeni su sledeći rezultati za granulaciju 4 mm i odnos mešanja 1:10.000 (tabela 16):

Tabela 16. Rezultati ispitivanja homogenosti u mešalici sa oblogom sa 27 % perforacija, za odnos mešanja 1:10.000 i kukuruz granulacije 4 mm

Broj Uzorka	Apsorbancija			
	6 min	8 min	10 min	12 min
1	0.5174	0.5348	0.6104	0.5360
2	0.4241	0.5311	0.5637	0.5450
3	0.5575	0.5578	0.5021	0.5890
4	0.4429	0.5433	0.5728	0.5390
5	0.3928	0.5407	0.6468	0.6400
6	0.4377	0.6025	0.5980	0.6882
7	0.4152	0.5610	0.6003	0.6561
8	0.4534	0.5608	0.6418	0.5888
9	0.4150	0.7092	0.5520	0.5900
10	0.4237	0.5997	0.6853	0.5776
Srednja vrednost, \bar{x}	0.440	0.574	0.597	0.595
Standardna devijacija, σ	0.05	0.05	0.05	0.05
Koeficijent varijacije, CV (%)	11.6	9.3	8.9	8.7

Kako se može videti iz tabele, već nakon 8 minuta mešanja, postignuta je zadovoljavajuća homogenost (CV=9,3%) koja se sa produžetkom mešanja neznatno smanjila (8.9% i 8.7%). Povećanjem broja perforacija, vreme mešanja je skraćeno za još 15%, što u odnosu na originalnu konstrukciju mešalice ukupno iznosi 30% ili 1/3 ukupnog vremena mešanja.

Kod granulacije od 3 mm (tabela 17) procenat smanjenja je nešto manji ali je i ovde ostvaren isti učinak, tj. vreme mešanja je skraćeno sa 12 na 8 minuta.

Tabela 17. Rezultati ispitivanja homogenosti u mešalici sa oblogom sa 27 % perforacija, za odnos mešanja 1:10.000 i kukuruz granulacije 3 mm

Broj Uzorka	Apsorbancija			
	6 min	8 min	10 min	12 min
1	0.4210	0.4560	0.4420	0.4114
2	0.4540	0.4130	0.5539	0.4247
3	0.4220	0.4320	0.4773	0.4408
4	0.5030	0.4650	0.4474	0.4599
5	0.3690	0.4710	0.5226	0.4883
6	0.3970	0.4930	0.4219	0.4671
7	0.4250	0.5010	0.5091	0.4775
8	0.5110	0.5480	0.4299	0.4371
9	0.4631	0.4760	0.4839	0.5190
10	0.5330	0.5680	0.5050	0.5394
Srednja vrednost, \bar{x}	0.453	0.482	0.479	0.466
Standardna devijacija, σ	0.05	0.05	0.04	0.04
Koeficijent varijacije, CV (%)	11.7	9.9	9.1	8.8

Rezultati za odnos mešanja 1:100.000 i granulacije 3 i 4 mm, su prikazani u tabelama 18 i 19. Kod ovog odnosa mešanja, promene u konstrukciji su dovele do smanjenja koeficijenta varijacije ali zahtevana vrednost od 5% nije mogla da se postigne ni za vreme mešanja od 15 minuta.

Tabela 18. Rezultati ispitivanja homogenosti u mešalici sa oblogom sa 27 % perforacija, za odnos mešanja 1:100.000 i kukuruz granulacije 4 mm

Broj Uzorka	Apsorbancija			
	6 min	8 min	10 min	15 min
1	0.2439	0.2684	0.3146	0.2760
2	0.2892	0.2779	0.2778	0.2327
3	0.2517	0.2789	0.2920	0.2487
4	0.2963	0.2556	0.2552	0.2116
5	0.2827	0.3005	0.2946	0.2578
6	0.1867	0.2856	0.2871	0.2786
7	0.2575	0.2961	0.2752	0.2632
8	0.2827	0.2327	0.3090	0.2781
9	0.3409	0.2213	0.3292	0.2769
10	0.2611	0.2237	0.3571	0.2564
Srednja vrednost, \bar{x}	0.272	0.264	0.297	0.258
Standardna devijacija, σ	0.04	0.03	0.03	0.02
Koeficijent varijacije, CV (%)	14.8	11.1	9.9	8.6

Tabela 19. Rezultati ispitivanja homogenosti u mešalici sa oblogom sa 27 % perforacija, za odnos mešanja 1:100.000 i kukuruz granulacije 3 mm

Broj Uzorka	Apsorbancija			
	6 min	8 min	10 min	15 min
1	0.2559	0.2681	0.2813	0.2280
2	0.2415	0.3209	0.2638	0.2328
3	0.2317	0.2396	0.2666	0.3027
4	0.2530	0.2258	0.2942	0.2535
5	0.3318	0.3040	0.2763	0.2795
6	0.3580	0.2936	0.2491	0.2496
7	0.2517	0.2488	0.2966	0.2789
8	0.2404	0.3144	0.3251	0.2621
9	0.2650	0.2490	0.3428	0.2738
10	0.3150	0.2915	0.3215	0.2730
Srednja vrednost, \bar{x}	0.276	0.276	0.293	0.263
Standardna devijacija, σ	0.04	0.03	0.03	0.02
Koeficijent varijacije, CV (%)	15.9	12.2	10.3	8.7

4.5 Rezultati ispitivanja homogenosti kod obloge sa 40 % perforacija

Nakon ispitivanja mešanja sa oblogom u potpunosti izrađenoj od perforiranog lima, što je iznosilo 40 % u odnosu na ukupnu površinu obloge, pri odnosu mešanja 1:10.000 i granulacijama 3 i 4 mm, dobijeni su rezultati prikazani u tabelama 20 i 21.

Tabela 20. Rezultati ispitivanja homogenosti u mešalici sa oblogom sa 40 % perforacija, za odnos mešanja 1:10.000 i kukuruz granulacije 4 mm

Broj Uzorka	Apsorbancija			
	6 min	8 min	10 min	12 min
1	0.5800	0.6046	0.5212	0.5248
2	0.5780	0.5087	0.5740	0.5556
3	0.4914	0.5406	0.6257	0.5000
4	0.5532	0.5739	0.5323	0.5342
5	0.5074	0.6067	0.5483	0.5890
6	0.5339	0.5030	0.5287	0.5776
7	0.6844	0.5529	0.5713	0.5424
8	0.5956	0.5301	0.5648	0.5228
9	0.5817	0.5597	0.5553	0.5690
10	0.5051	0.6552	0.5406	0.5729
Srednja vrednost, \bar{x}	0.559	0.564	0.556	0.549
Standardna devijacija, σ	0.06	0.05	0.03	0.03
Koeficijent varijacije, CV (%)	10.2	8.5	5.5	5.2

Rezultati sa granulacijom od 4 mm su pokazali da je došlo do smanjenja vremena mešanja za gotovo 50% u odnosu na prvobitnu konstrukciju mešalice. Na ovaj način, vreme mešanja se približilo vremenu koje je neophodno da se postigne homogenost u horizontalnoj mešalici istog kapaciteta. Prema navodima iz literature i podacima o horizontalnim mešalicama raspoloživim na tržištu, vreme mešanja za ovaj tip mešalice se kreće od 3-6 minuta, pri čemu mešalice ovog kapaciteta zahtevaju motor snage najmanje 1.1 kW. Ispitana vertikalna mešalica poseduje motor snage 0.55 kW, što znači da u startu zahteva manje energije od horizontalne mešalice. Smanjenje vremena mešanja, odnosno rada vertikalne mešalice, doprinosi i smanjenju utroška energije prilikom rada.

Isti efekat je postignut i kod granulacije od 3 mm (tabela 21)

Tabela 21. Rezultati ispitivanja homogenosti u mešalici sa oblogom sa 40% perforacija, za odnos mešanja 1:10.000 i kukuruz granulacije 3 mm

Broj Uzorka	Apsorbancija			
	6 min	8 min	10 min	12 min
1	0.5082	0.5076	0.4301	0.4634
2	0.4579	0.5223	0.4697	0.5544
3	0.4141	0.4344	0.5288	0.5338
4	0.4504	0.5077	0.4441	0.5533
5	0.4255	0.4236	0.4594	0.5597
6	0.4204	0.5624	0.5196	0.4888
7	0.3564	0.4931	0.5192	0.5018
8	0.4831	0.4437	0.4934	0.5227
9	0.5142	0.5369	0.4762	0.5314
10	0.4550	0.4756	0.4344	0.5604
Srednja vrednost, \bar{x}	0.442	0.491	0.477	0.527
Standardna devijacija, σ	0.05	0.05	0.04	0.03
Koeficijent varijacije, CV (%)	10.7	9.4	7.6	6.3

U slučaju odnosa mešanja 1:100.000, nije postignuta homogenost za izmerena vremena mešanja, sa koeficijentom varijacije <5%, ni kod jedne granulacije.

Tabela 22. Rezultati ispitivanja homogenosti u mešalici sa oblogom sa 40 % perforacija, za odnos mešanja 1:100.000 i kukuruz granulacije 4 mm

Broj Uzorka	Apsorbancija			
	6 min	8 min	10 min	15 min
1	0.2390	0.2512	0.2807	0.2328
2	0.2644	0.2487	0.2308	0.2294
3	0.2713	0.2647	0.2456	0.2473
4	0.3432	0.3291	0.2286	0.2306
5	0.2573	0.2631	0.2535	0.2561
6	0.2403	0.2353	0.2143	0.2560
7	0.2756	0.2938	0.2477	0.2728
8	0.2406	0.2964	0.2411	0.2494
9	0.2946	0.2488	0.2709	0.2769
10	0.2691	0.2547	0.2778	0.2564
Srednja vrednost, \bar{x}	0.273	0.271	0.246	0.251
Standardna devijacija, σ	0.03	0.03	0.02	0.02
Koeficijent varijacije, CV (%)	11.5	10.7	9.0	6.6

Međutim, kod granulacije 4 mm nakon 15 minuta mešanja, vrednost koeficijenta varijacije je dostigla 6.6%. Obzirom da produženje vremena mešanja nije opravdano sa stanovišta ekonomičnosti, pretpostavka je da bi se daljim

rekonstrukcijama mešalice, tj. povećavanjem broja ili površine perforacija obloge puža, mogli dobiti zadovoljavajući rezultati.

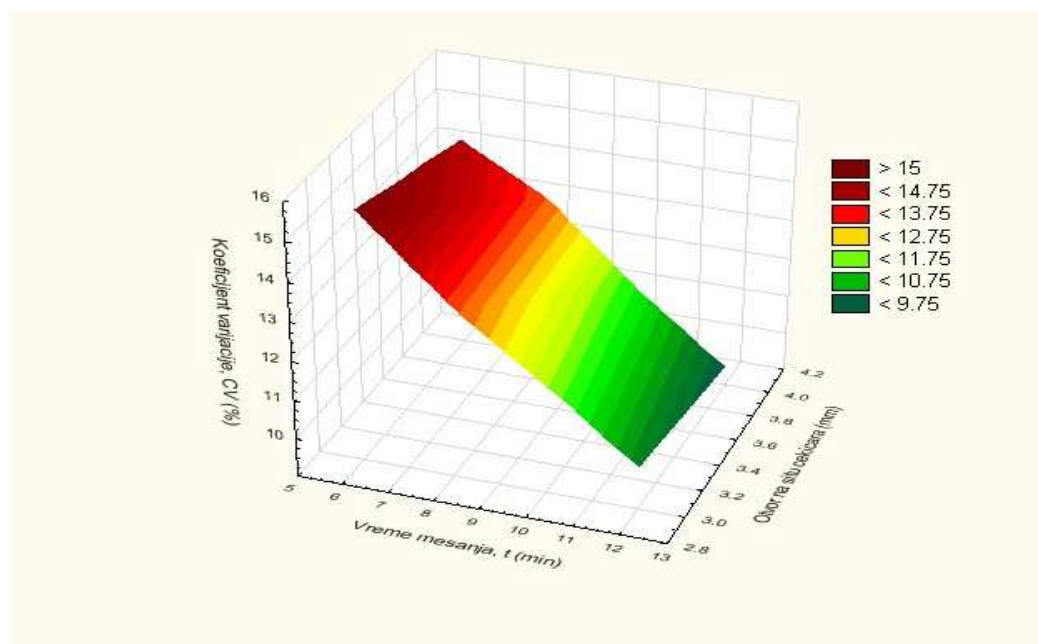
Tabela 23. Rezultati ispitivanja homogenosti u mešalici sa oblogom sa 40 % perforacija, za odnos mešanja 1:100.000 i kukuruz granulacije 3 mm

Broj Uzorka	Apsorbancija			
	6 min	8 min	10 min	15 min
1	0.2419	0.2638	0.2620	0.2760
2	0.2632	0.2156	0.2774	0.2520
3	0.2334	0.2352	0.2908	0.2604
4	0.2397	0.2348	0.2552	0.2136
5	0.2886	0.2916	0.3365	0.2522
6	0.2391	0.2867	0.3222	0.2610
7	0.2953	0.2997	0.2767	0.2854
8	0.2858	0.2611	0.3056	0.2825
9	0.3063	0.2671	0.2920	0.2675
10	0.3283	0.3021	0.2576	0.2291
Srednja vrednost, \bar{x}	0.276	0.266	0.290	0.258
Standardna devijacija, σ	0.03	0.03	0.03	0.02
Koeficijent varijacije, CV (%)	12.1	11.2	9.4	8.8

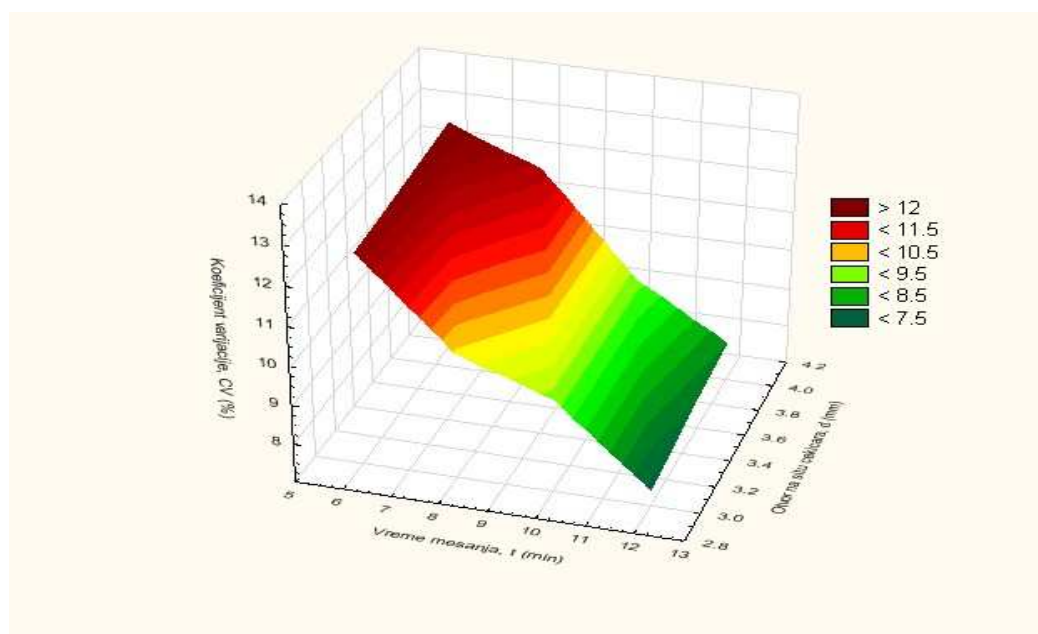
Sličan učinak je postignuti kod granulacije kukuruza od 3 mm, gde su koeficijenti varijacije za 10 i 15 minuta, nešto ispod 10% (9.4 i 8.8 %). Na osnovu rezultata dobijenih za odnos mešanja 1:100.000 kod svih obloga sa i bez perforacija, nije bilo moguće postići koeficijent varijacije ispod 5 %. Međutim, kada se uporede vrednosti dobijene kod mešanja sa perforiranim oblogama i originalnom konstrukcijom mešalice, postignuto je značajno poboljšanje koje je zavisilo od procenta perforacija koje su obloge sadržavale. U slučaju mešanja sa 40% perforacija, dobijeno je poboljšanje za 31.7% u odnosu na mešanje u originalnoj konstrukciji mešalice kod kukuruza 4 mm. Kod kukuruza od 3 mm ovo poboljšanje je bilo nešto manje i iznosilo je 29.5%.

4.6 SUMARNI REZULTATI

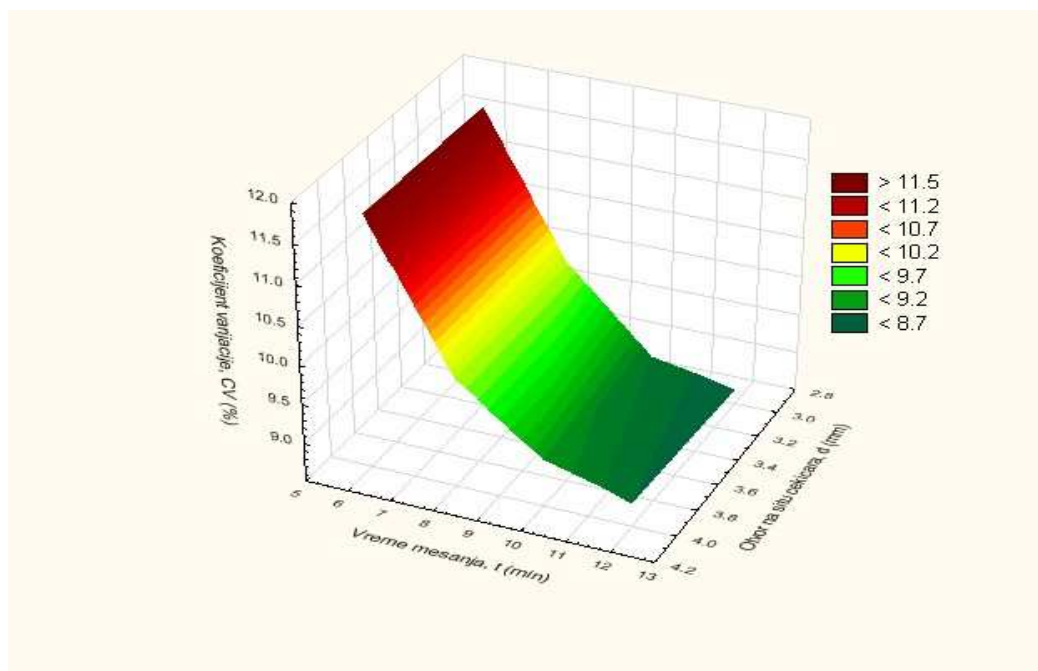
Zavisnost koeficijenta varijacije od vremena mešanja i granulacije kukuruza za različite obloge puža i odnose mešanja, dato je u dijagramima na slikama 27-34.



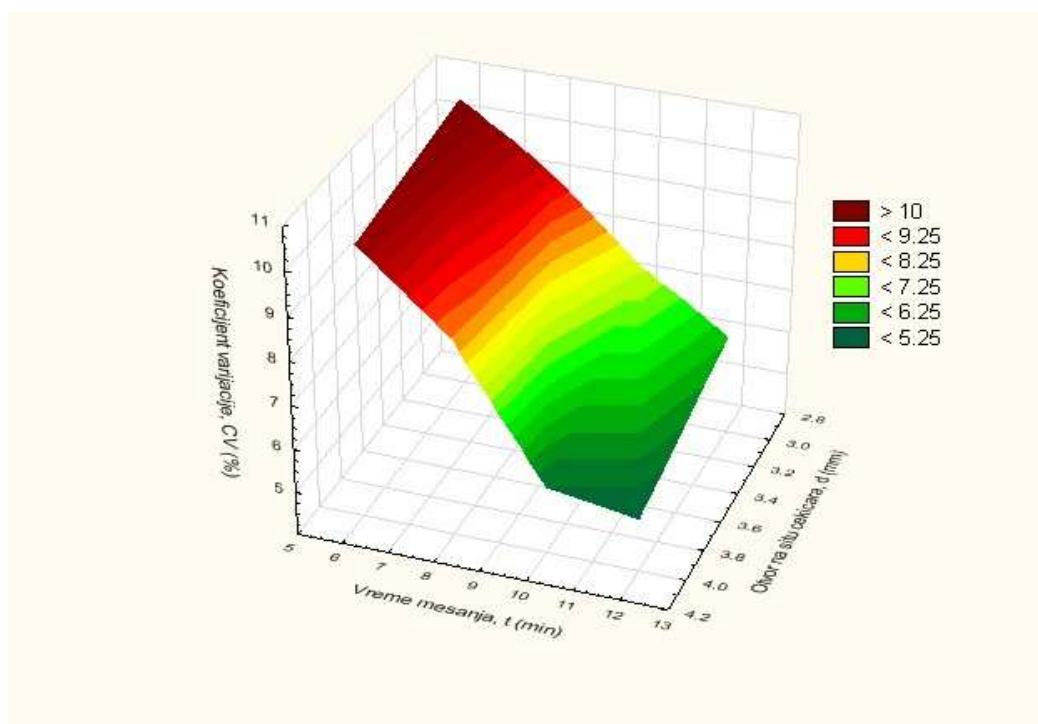
Slika 27. Zavisnost koeficijenta varijacije od granulacije i vremena mešanja kod originalne konstrukcije mešalice, za odnos mešanja 1:10.000



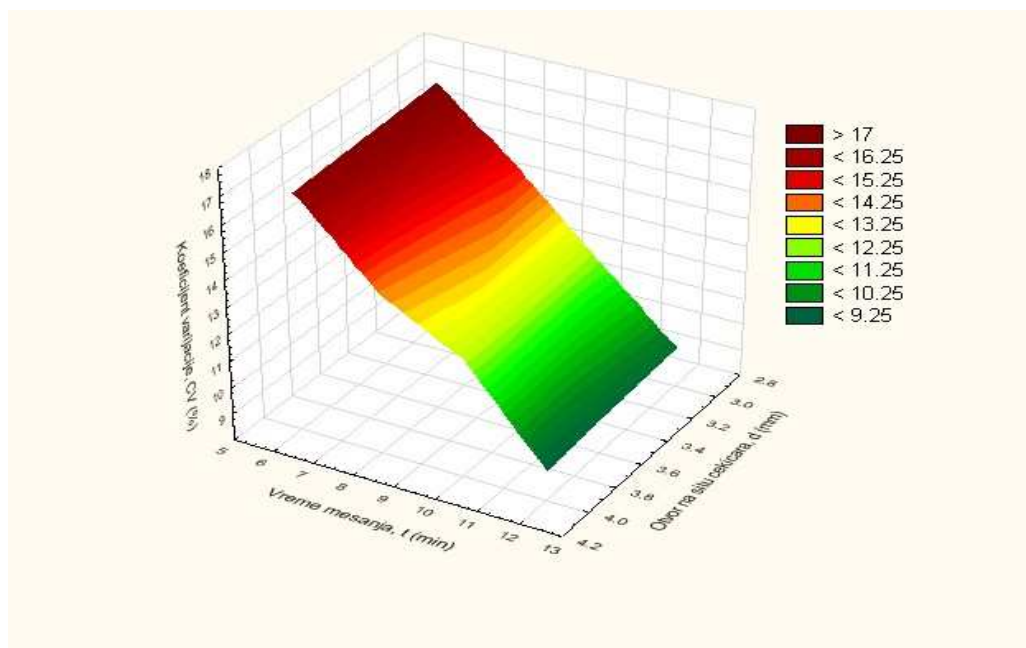
Slika 28. Zavisnost koeficijenta varijacije od granulacije i vremena mešanja kod mešalice sa 13.5% perforacija na oblozi, za odnos mešanja 1:10.000



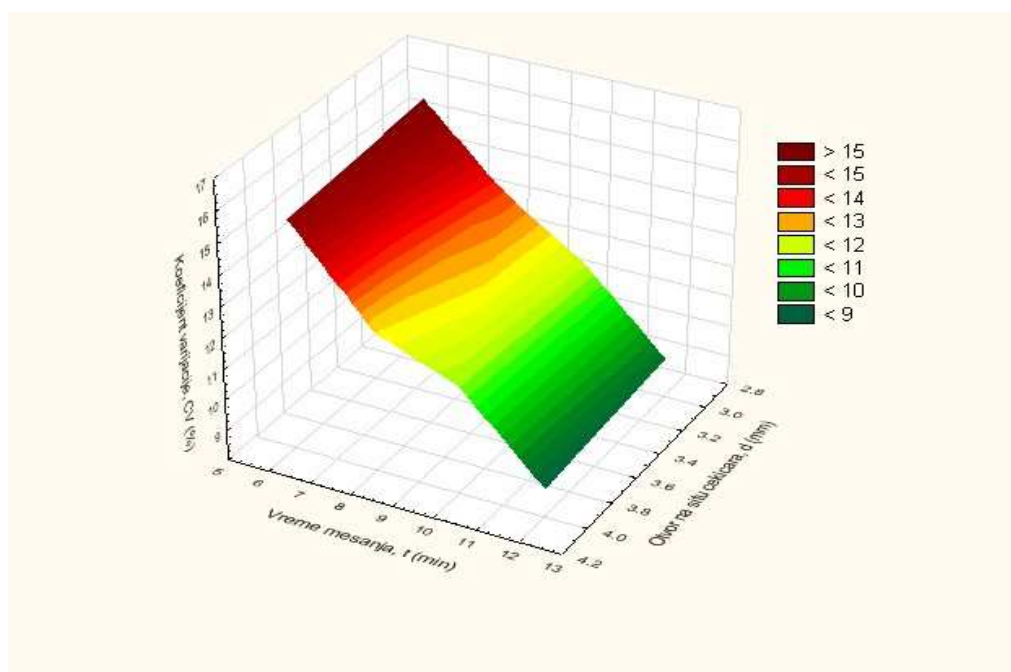
Slika 29. Zavisnost koeficijenta varijacije od granulacije i vremena mešanja kod mešalice sa 27% perforacija na oblozi, za odnos mešanja 1:10.000



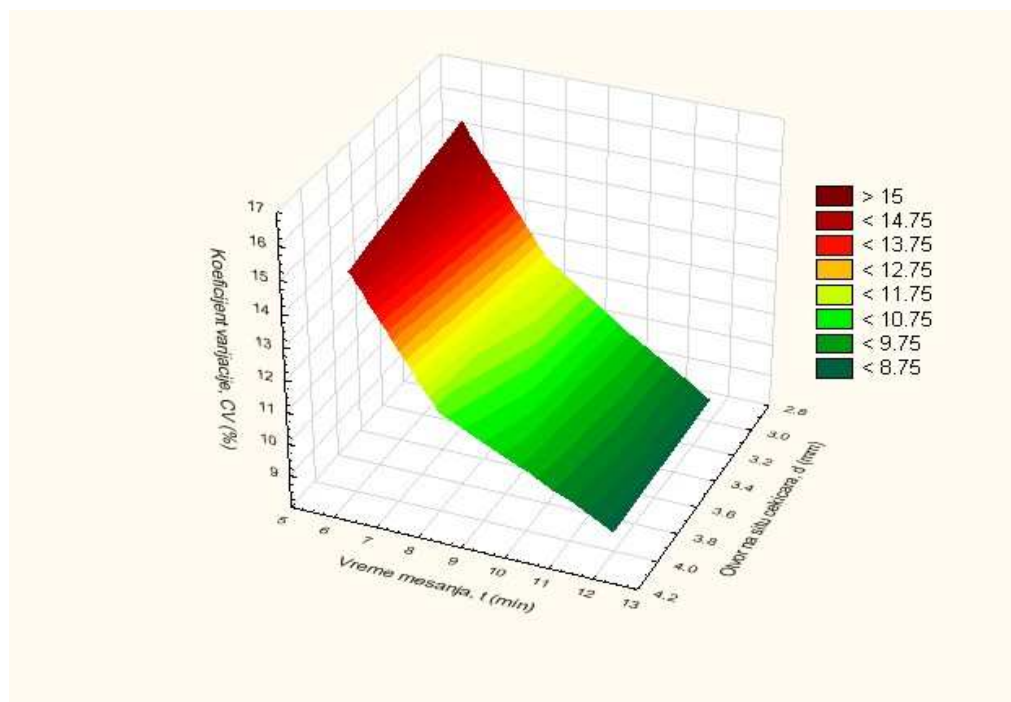
Slika 30. Zavisnost koeficijenta varijacije od granulacije i vremena mešanja kod mešalice sa 40% perforacija na oblozi, za odnos mešanja 1:10.000



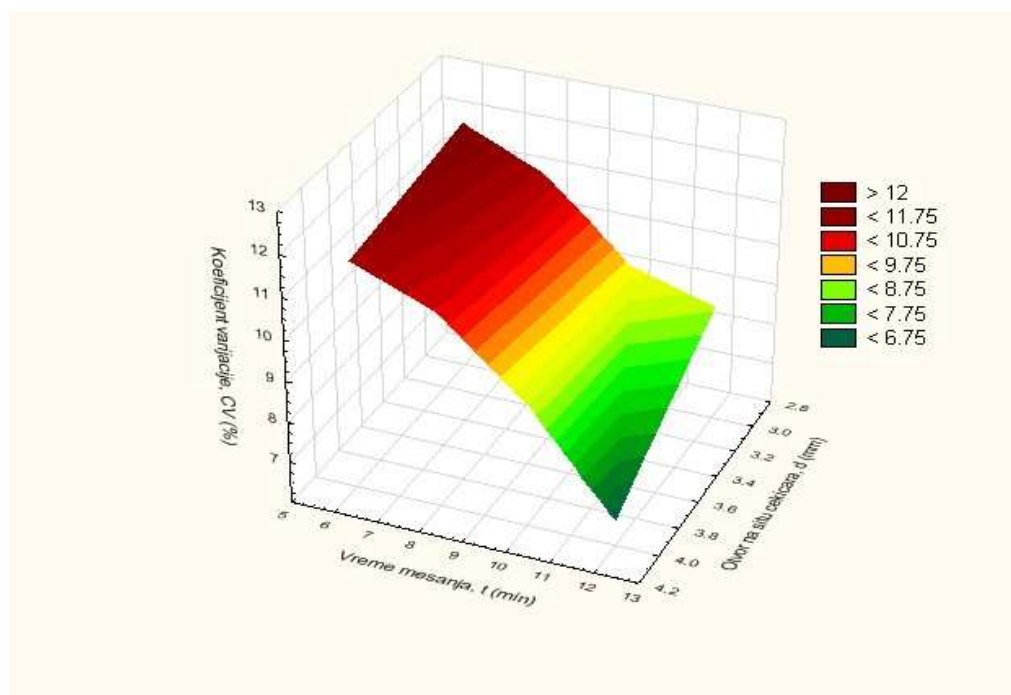
Slika 31. Zavisnost koeficijenta varijacije od granulacije i vremena mešanja kod originalne konstrukcije mešalice, za odnos mešanja 1:100.000



Slika 32. Zavisnost koeficijenta varijacije od granulacije i vremena mešanja kod mešalice sa 13.5% perforacija na oblozi, za odnos mešanja 1:100.000



Slika 33. Zavisnost koeficijenta varijacije od granulacije i vremena mešanja kod mešalice sa 27% perforacija na oblozi, za odnos mešanja 1:100.000

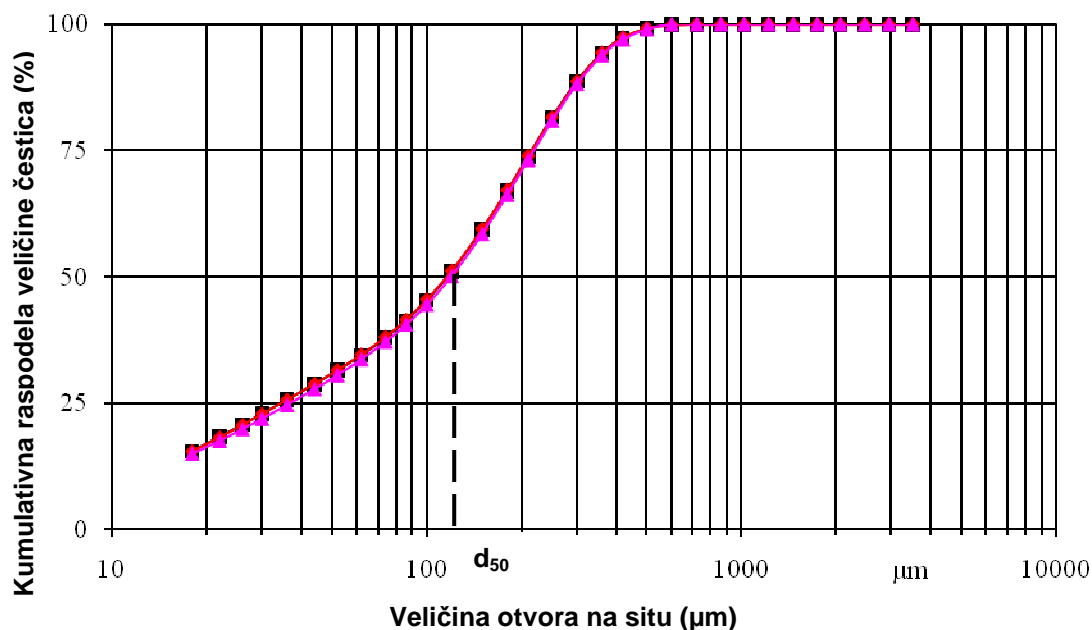


Slika 34. Zavisnost koeficijenta varijacije od granulacije i vremena mešanja kod mešalice sa 40% perforacija na oblozi, za odnos mešanja 1:100.000.

Na bazi rezultata prikazanih na dijagramima (slike 27-34), može se izvesti zaključak da sa povećanjem broja perforacija na oblozi puža i u ovom slučaju, povećanjem granulacije materijala (kukuruz), dolazi do smanjenja koeficijenta varijacije. Ova činjenica se odražava na dužinu vremena mešanja koja se značajno smanjuje, u odnosu na početne vrednosti kod originalne konstrukcije mešalice kako pri odnosu mešanja 1:10.000, tako i za odnos mešanja 1:100.000.

4.7 Rezultati ispitivanja nosača (kukuruznog brašna) upotrebljenog za testove u cilindričnoj mešalici

Granulacija kukuruznog brašna je ispitana na uređaju za foto-optičku analizu veličine čestica, tzv. CPA (Computerized Particle Analyser), pod pritiskom od 3 bara i vlažnosti materijala od 11.4 %. (slika 35 i 36)



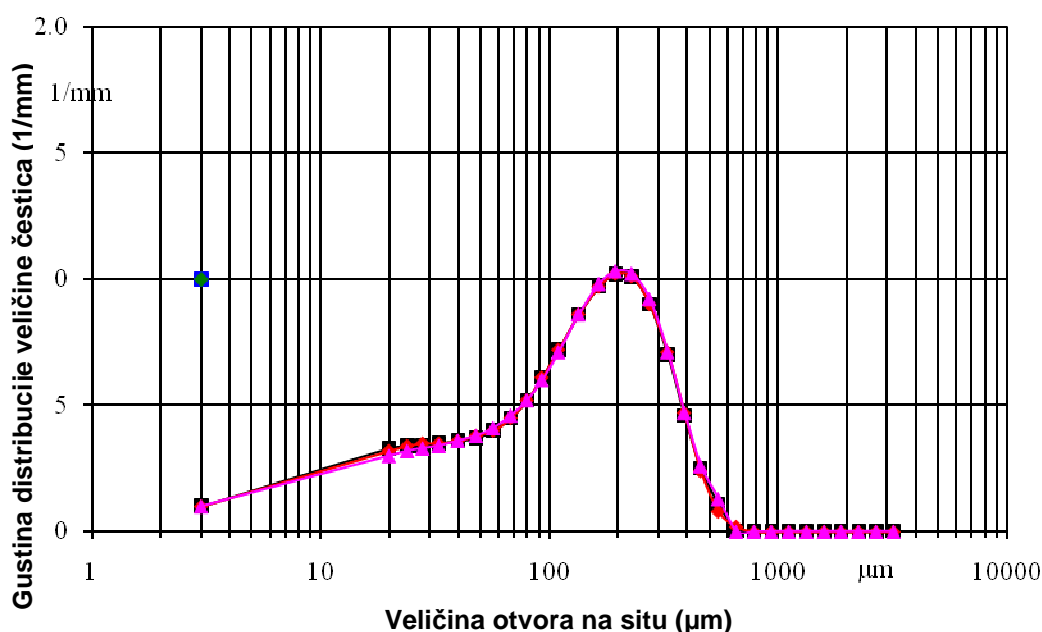
Slika 35. Kumulativna kriva distribucije čestica kukuruznog brašna

Na slici 35 je predstavljena kumulativna kriva distribucije veličine čestica gde se može videti da srednji prečnik čestica d_{50} iznosi oko 130 mikrona, što predstavlja materijal veoma fine granulacije. Takođe, na osnovu dijagrama gustine distribucije (slika 19), vrednosti veličine čestica se kreću od nekoliko mikrona ($5 \mu\text{m}$), pa sve do

1 mm ali se najveći procenat čestica nalazi u opsegu između 100 i 200 mikrona. Ovo ukazuje na veoma ujednačenu veličinu čestica,

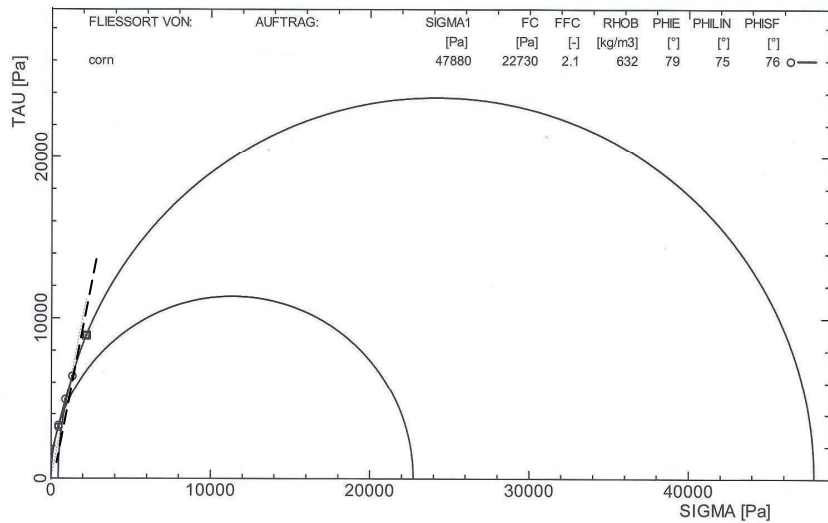
Segregacija, koja predstavlja uobičajeni problem u mnogim industrijskim operacijama (mešanje, transport, skladištenje), je pojava koja prati mešanje i u suprotnosti je sa njim. Postoji mnogo uzroka ovog fenomena. Najčešći uzrok jeste razlika u veličini i obliku čestica ili njihovoj specifičnoj težini, zbog čega usled kretanja čestica dolazi do njihovog raslojavanja. (Hongming, 2002)

Eksperimenti pokazuju da se kod smeša sa česticama kod kojih je srednji prečnik manji od 500 μm , segregacija znatno manja (Carson, 1986).



Slika 36. Prikaz gustine distribucije čestica nosača

Na slici 37 je prikazan dijagram merenja protočnosti materijala na Jenike shear tester uređaju.



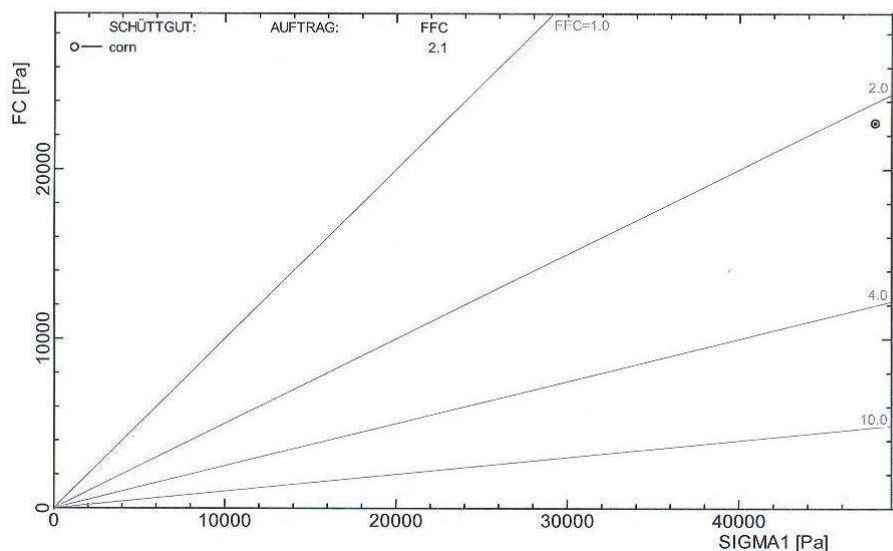
Slika 37. Kriva konsolidacije materijala (kukuruznog brašna) nakon Jenike shear testa

Parametri koji opisuju ova svojstva, mogu se odrediti iz prinosa lokusa (slika 37). Relevantni stres konsolidacije σ_1 jednak glavnom stresu u okviru Morovog kruga stresa, a koji je tangencijalan na prinos lokusa i ukršta se u tački stalnog protoka (σ_{pre} , T_{pre}). Ovaj krug predstavlja stresove kojima je izložen materijal u toku merenja, a na kraju procesa konsolidacije (stres u stalnom stanju protoka).

Prava linija koja prolazi kroz koordinatni početak σ , τ -dijagrama, a koja predstavlja tangentu na Morov krug je efektivni prinos lokusa i definisan je od strane Jenike-a (Andrew Jenike, 1999) (isprekidana linija na slici). Ona sa σ -osom zaklapa ugao φ_e koji se naziva efektivni ugao unutrašnjeg trenja. Obzirom da najveći krug (Morov krug stresa) označava stacionarno stanje protoka, ugao φ_e se može smatrati merom unutrašnjeg trenja u stanju mirovanja. Ovaj ugao je potreban za projektovanje procesa, u kojima protočnost materijala ima odlučujuću ulogu.

Schüttgut	Auftrag	SIGMA1 [Pa]	FC [Pa]	FFC [-]	FFRHO [-]	RHOB [kg/m3]
corn		47880	22730	2,11	1,33	632

Approximation der Fließorte: Geradenabschnitte
Prorating: an



Slika 38. Protočnost nosača (kukuruzno brašno)

Protočnost praškastih materijala uglavnom se karakteriše veličinom ffc koja se definiše kao odnos konsolidacionog stresa σ_1 i neograničenog prinosa snage σ_c i karakteriše protočnost brojčano jednačinom (21):

$$ffc = \sigma_1 / \sigma_c \quad (21)$$

Što je vrednost ffc veća, to je manji neograničeni prinos snage u odnosu na konsolidacijski stres, a time je protočnost materijala bolja. Na osnovu ovih vrednosti, klasifikacija protočnosti se može predstaviti kao sledeća:

- $ffc < 1$ neprotočni materijali
- $1 < ffc < 2$ veoma kohezivni
- $2 < ffc < 4$ kohezivni
- $4 < ffc < 10$ lako protočni
- $10 < ffc$ veoma protočni

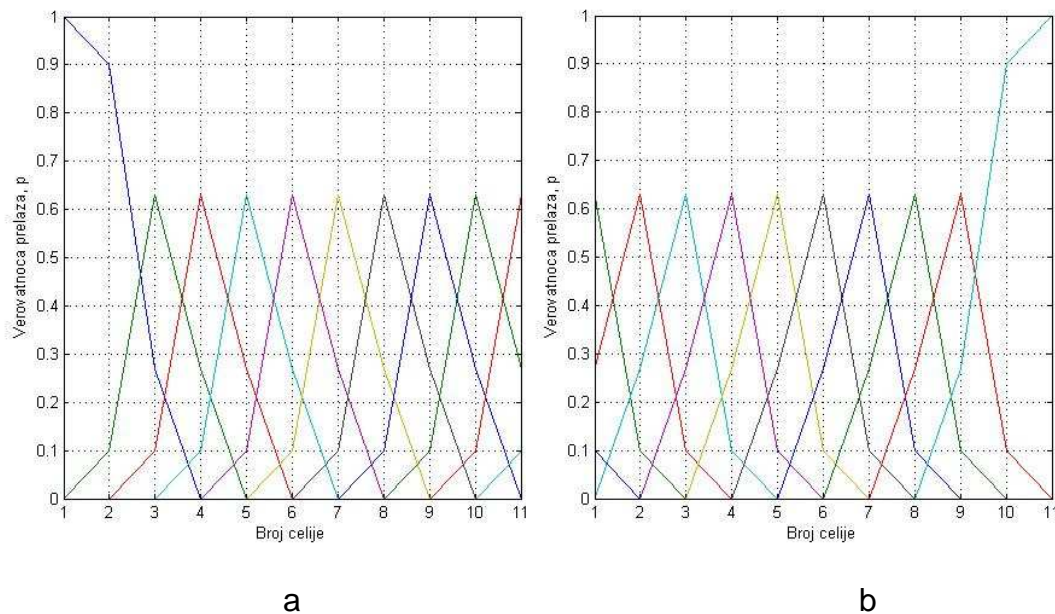
Prema rezultatima sa slike 21, i na osnovu vrednosti veličine $ffc = 2.1$, može se zaključiti da ispitani materijal spada u grupu kohezivnih ili slabije protočnih materijala.

4.8 Rezultati ispitivanja cilindrične mešalice

4.8.1 Model kretanja čestica u mešalici

Da bi se proverila pretpostavka o kretanju čestica unutar smeše i verovatnoće kojima one prelaze iz jedne ćelije u drugu, urađeni su eksperimenti u laboratorijskoj cilindričnoj mešalici.

Grafički, svaki od prelaza unutar ćelija mešalice, a u zavisnosti od broja obrtaja kojim je materijal podvrgnut, može se predstaviti na sledeći način (slika 39):

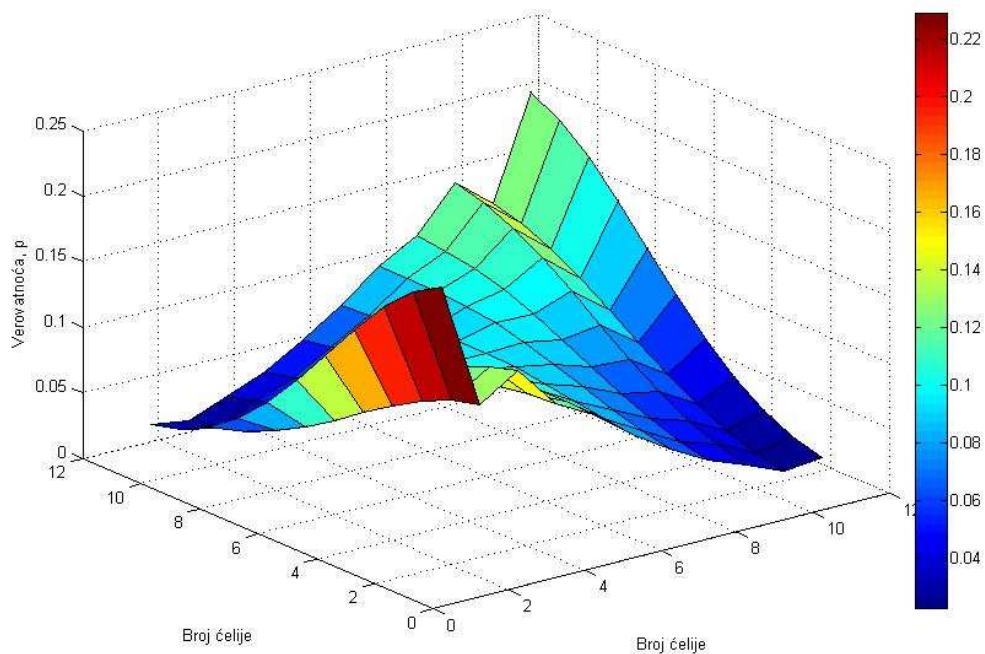


Slika 39. Verovatnoće prelaza iz jedne ćelije u drugu prilikom okreta mešalice u levo(a) i u desno (b)

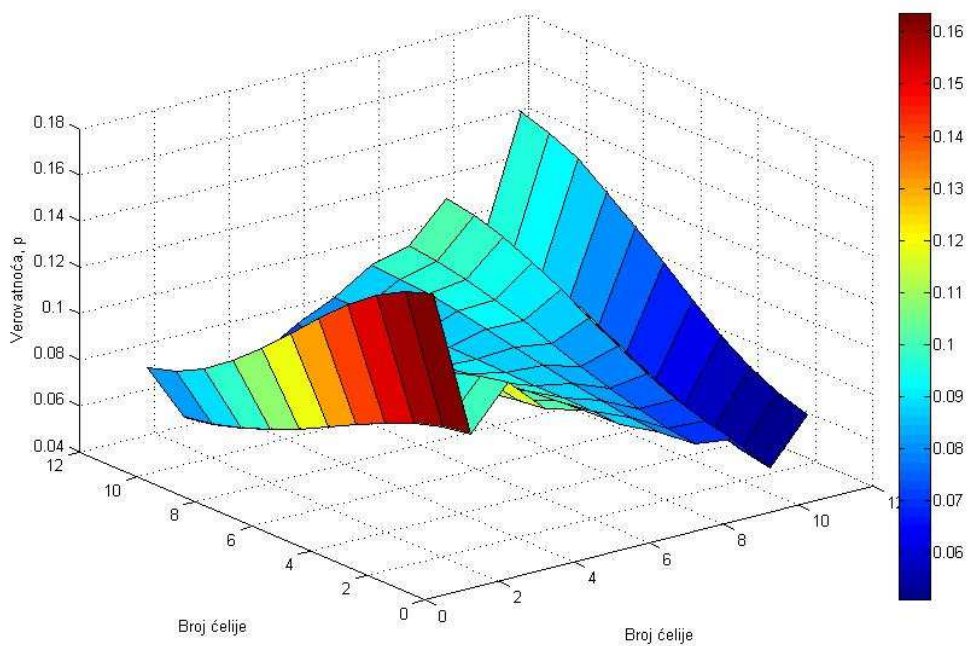
Jednačina za dobijanje stanja (22) nakon određenog vremena t , koje je u ovom slučaju zamenjeno sa brojem obrtaja mešalice je iskazana kao:

$$T_{50} = [T_{1/2}(\text{okret u desno}) * T_{1/2}(\text{okret u levo})]^{50} \quad (22)$$

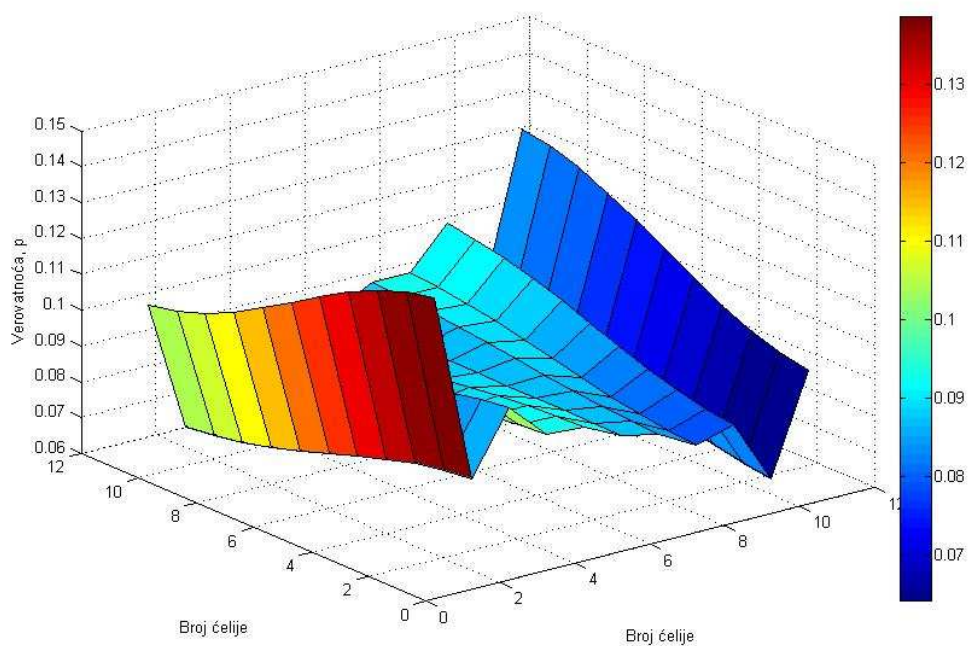
Na slikama 25 a, b, c, d i e su prikazne 3D dijagrami kretanja verovatnoća prelaza čestica iz ćelije u ćeliju, za različite obrtaje mešalice.



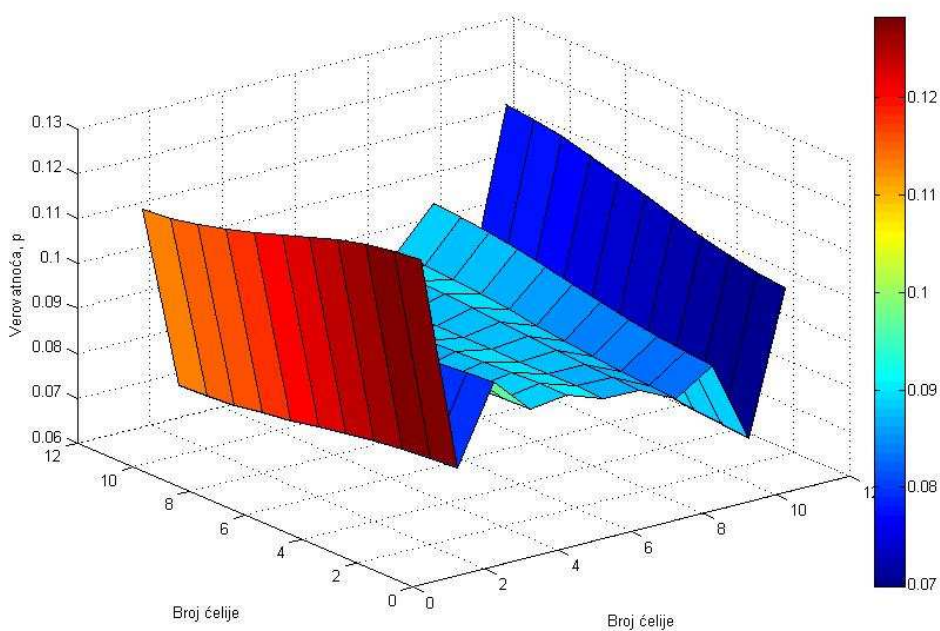
a (N=50)



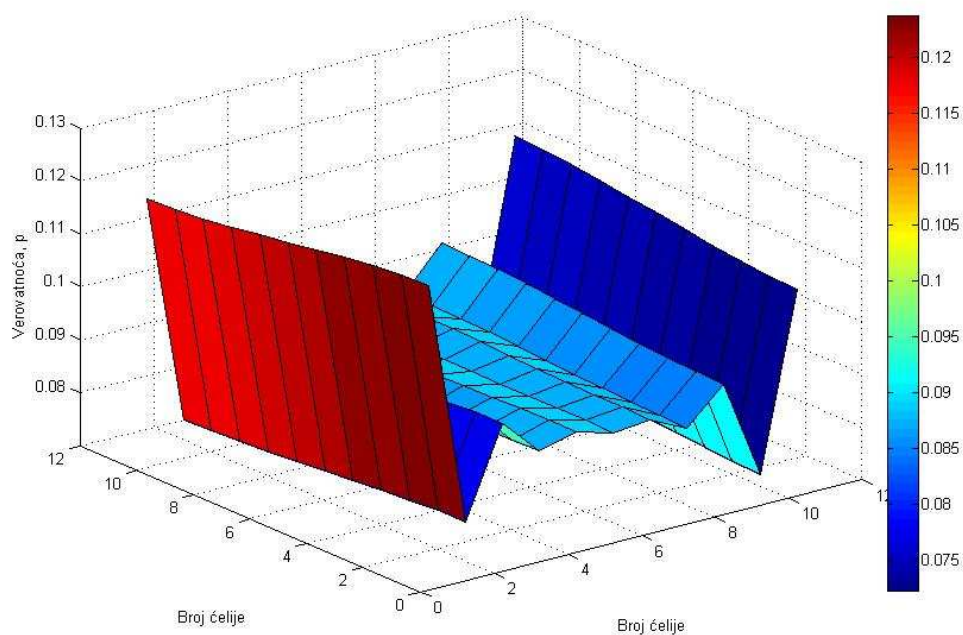
b (N=100)



c (N=150)



d (N=200)



e (N=250)

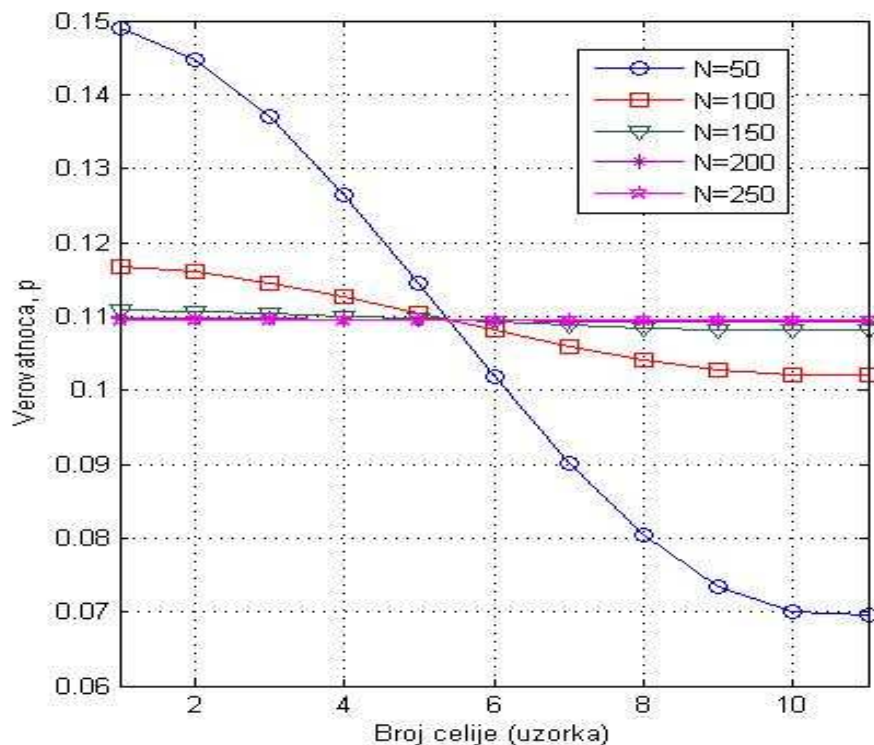
Slika 40 (a, b, c, d, e). Grafički prikaz kretanja verovatnoće nalaženja čestica nakon različitih obrtaja mešalice

Na osnovu rezultata istraživanja, u matrici tranzicionih verovatnoća parametri p i r su zamenjeni vrednostima $p=0.9$ i $r=0.5$, pa su brojčane vrednosti matrice dobijene nakon 50 obrtaja mešalice prikazane na slici 41.

$$T^{50} = \begin{bmatrix} 0.2289 & 0.1317 & 0.1501 & 0.1181 & 0.1021 & 0.0795 & 0.0616 & 0.0453 & 0.0346 & 0.0227 & 0.0253 \\ 0.2148 & 0.1252 & 0.1439 & 0.1160 & 0.1024 & 0.0823 & 0.0659 & 0.0503 & 0.0403 & 0.0272 & 0.0317 \\ 0.1941 & 0.1153 & 0.1344 & 0.1122 & 0.1023 & 0.0859 & 0.0721 & 0.0577 & 0.0491 & 0.0345 & 0.0423 \\ 0.1672 & 0.1021 & 0.1214 & 0.1063 & 0.1013 & 0.0899 & 0.0798 & 0.0677 & 0.0615 & 0.0449 & 0.0580 \\ 0.1382 & 0.0873 & 0.1064 & 0.0984 & 0.0985 & 0.0928 & 0.0876 & 0.0786 & 0.0764 & 0.0577 & 0.0781 \\ 0.1095 & 0.0720 & 0.0904 & 0.0888 & 0.0939 & 0.0941 & 0.0945 & 0.0897 & 0.0928 & 0.0724 & 0.1020 \\ 0.0837 & 0.0575 & 0.0747 & 0.0783 & 0.0875 & 0.0934 & 0.0998 & 0.0998 & 0.1095 & 0.0877 & 0.1282 \\ 0.0621 & 0.0449 & 0.0605 & 0.0678 & 0.0803 & 0.0910 & 0.1031 & 0.1082 & 0.1252 & 0.1025 & 0.1544 \\ 0.0455 & 0.0348 & 0.0488 & 0.0584 & 0.0732 & 0.0876 & 0.1048 & 0.1145 & 0.1386 & 0.1155 & 0.1784 \\ 0.0346 & 0.0279 & 0.0406 & 0.0515 & 0.0677 & 0.0845 & 0.1053 & 0.1185 & 0.1481 & 0.1250 & 0.1963 \\ 0.0281 & 0.0237 & 0.0356 & 0.0470 & 0.0639 & 0.0822 & 0.1053 & 0.1208 & 0.1542 & 0.1311 & 0.2081 \end{bmatrix}$$

Slika 41. Brojčane vrednosti matrice nakon $N=50$

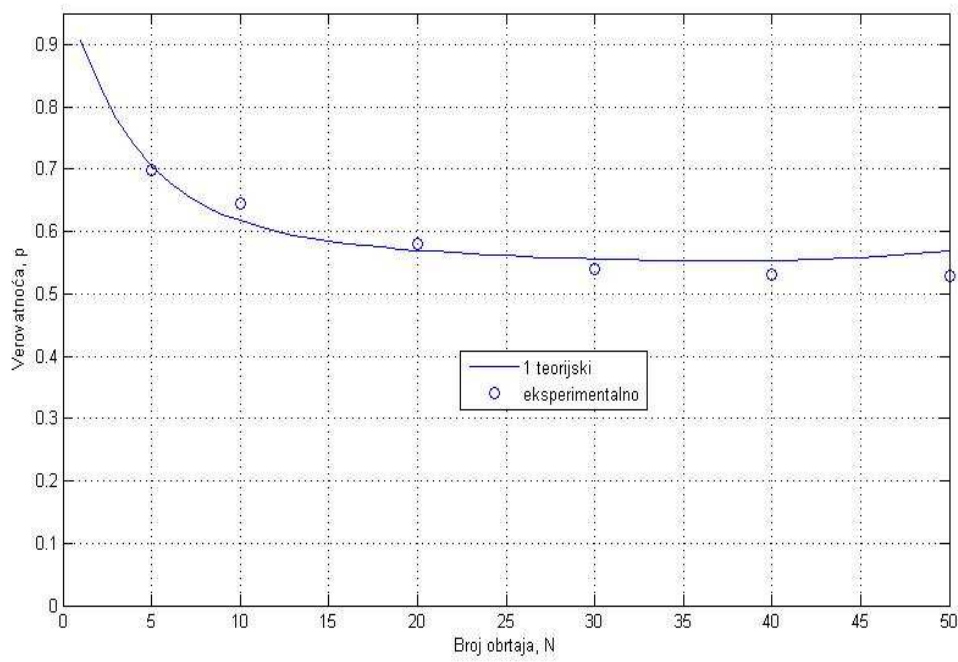
Prevodom u skalarnu veličinu dobijamo da su verovatnoće prelaza nakon 50 obrtaja mešalice neujednačene i da još uvek nije postignuta homogenost. Rezultati dobijeni daljim ispitivanjem, odnosno produženjem broja obrtaja (vremena mešanja) prikazani su na slici 42.



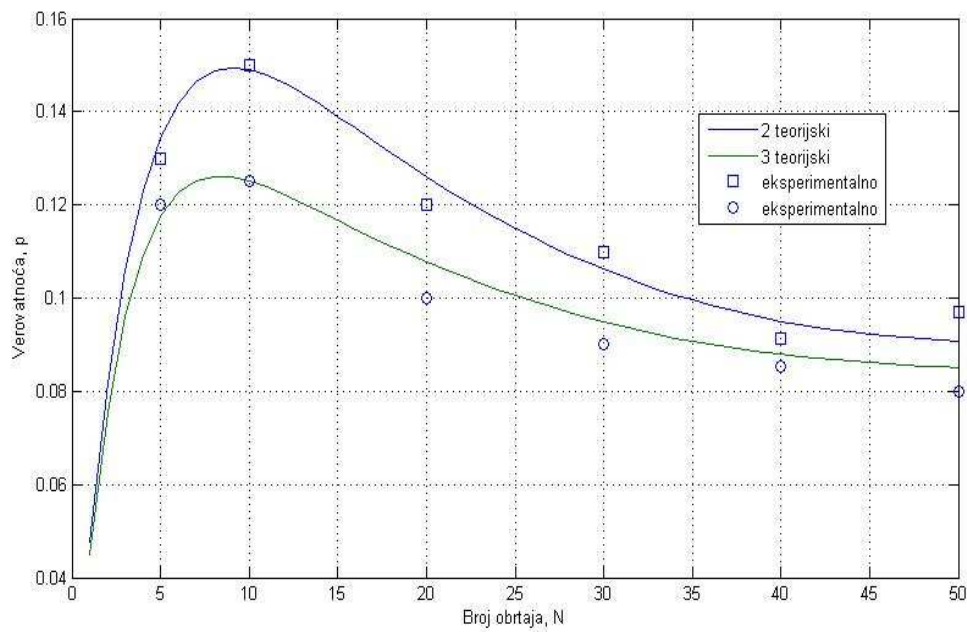
Slika 42. Promene verovatnoće u zavisnosti od broja obrtaja mešalice (vremena mešanja)

Kao što se može videti na slici 42., verovatnoće se menjaju produženjem vremena mešanja. Kod 50 obrtaja mešalice koje predstavlja mešanje u toku jednog minuta, zabeležena je neravnomernost tj. opadanje vrednosti za p počevši od 1 pa do 11 ćelija. Trend ujednačavanja se primećuje već nakon 100 obrtaja (2 minuta) da bi sa 250 obrtaja (5 minuta), verovatnoća nalaženja čestica u svakoj od ćelija bila jednaka. Praktično značenje ovih vrednosti se odražava u homogenosti sistema, odnosno ravnomernoj raspodeli čestica obeleživača u svakoj od 11 ćelija.

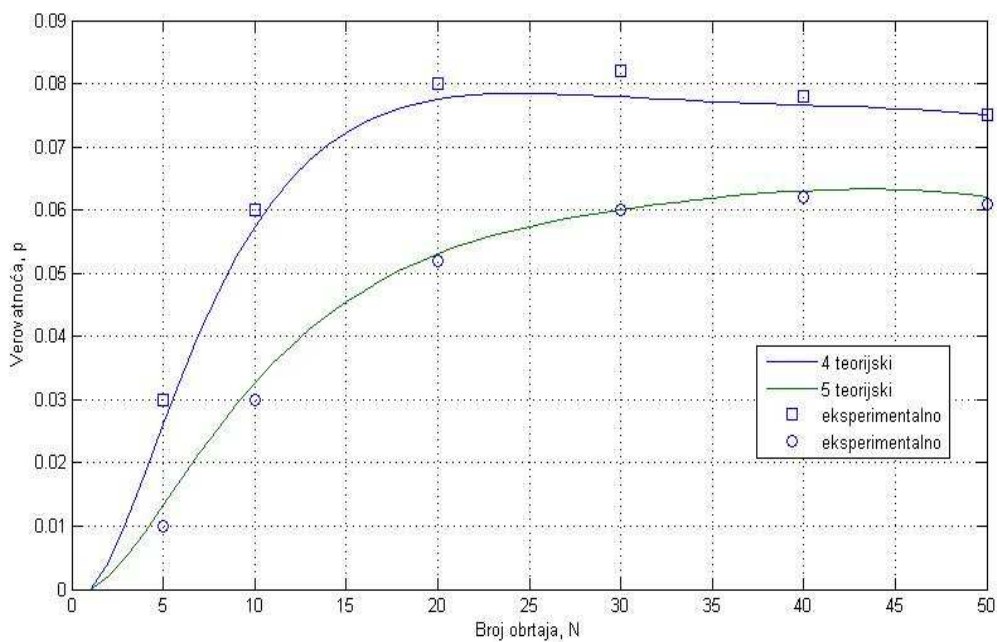
Zahvaljujući MATLAB programu, moguće je predstaviti model kretanja čestica u svakoj pojedinačnoj ćeliji u zavisnosti od broja obrtaja, tj. vremena mešanja. Pojedinačni grafički prikazi su prikazani na slikama 43 (a, b, c, d, e, f, g):



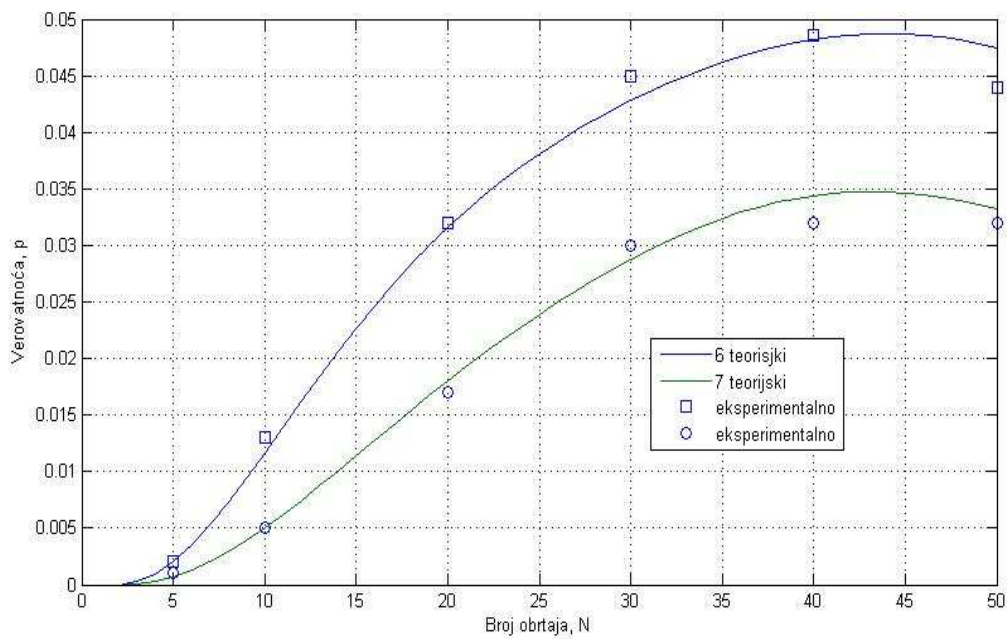
a (1)



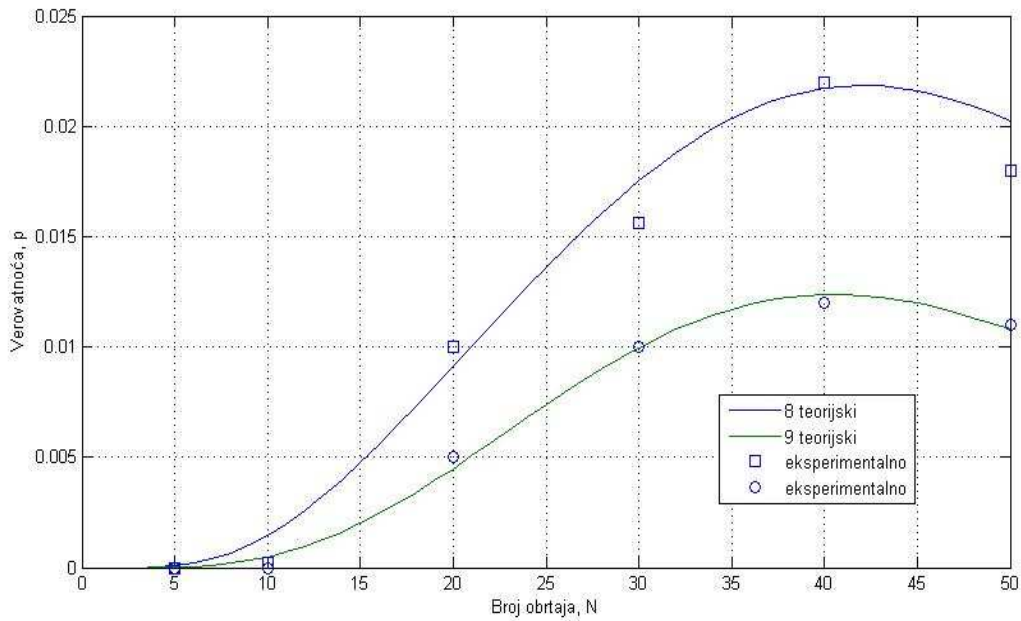
b (2, 3)



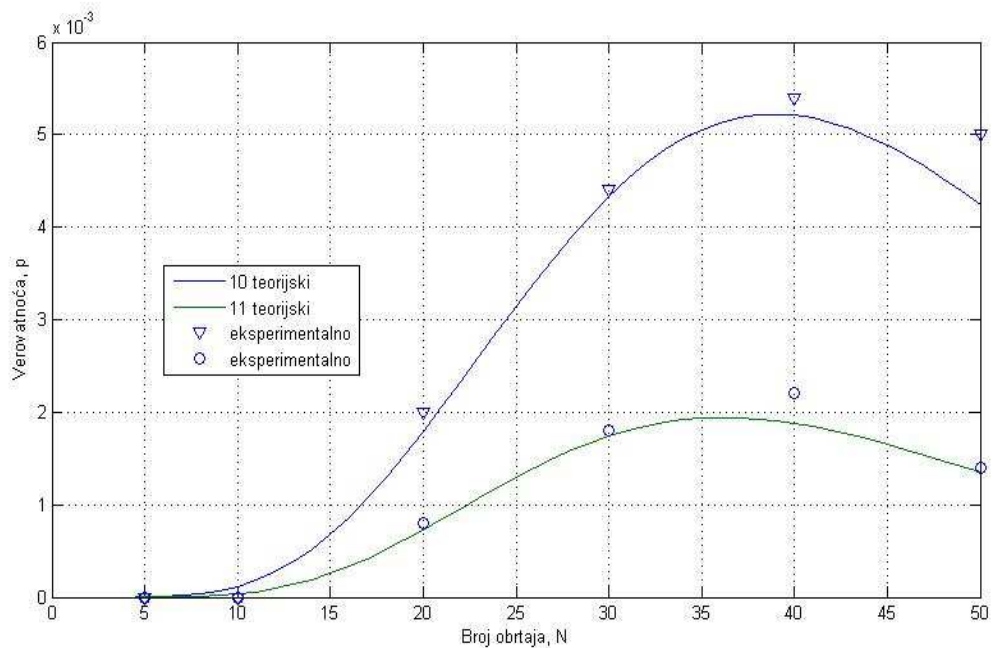
c (4, 5)



d (6, 7)



e (8, 9)



f (10, 11)

Slika 43. Prikaz verovatnoće prelaza za svaku pojedinačnu ćeliju i upoređenje sa eksperimentalno dobijenim podacima

Na slici 43 se mogu uočiti dobra slaganja između teorijskih (predviđenih) vrednosti i eksperimentalno dobijenih podataka, sa nešto većim odstupanjima kod ćelija 6, 8 i 10, što nije bitno uticalo na trend ponašanja čestica unutar smeše.

Slična istraživanja su rađena 2002. godine od strane *Aoun-Habache i sar.* ali je kao materijal za ispitivanje upotrebljen kus-kus obojen u dve različite boje, od kojih je jedna boja predstavljala obeleživač. Kao metoda za analizu homogenosti korištena je metoda analize slike, gde su koncentracije trejsera izračunate preko broja piksela za svaku tačkicu. Rezultati dobijeni na ovaj način su, sa nešto većim vrednostima verovatnoća ali sa u potpunosti, istim trendom kretanja. Ovakvo slaganje rezultata potvrđuje da dobijeni matematički model može sa uspehom da predvidi način ponašanja praškastih materijala, bez obzira na metodu za određivanje homogenosti, pod uslovom da se radi o materijalima sličnih osobina, u ovom slučaju materijalima koji nemaju previše izraženu osobinu segregacije.

4.8.2 Rezultati ispitivanja kod različitog nivoa napunjenosti mešalice

Kako je definisani model sistem pokazao dobra slaganja sa eksperimentalnim podacima, urađena su ispitivanja u cilindričnoj mešalici sa različitim nivoom punjenja (2, 1.5 i 1 kg materijala), a što je predstavljalo 60%, 50% i 30% ispunjenosti mešalice i za različito vreme mešanja (1, 2, 3, 4 i 5 min). Rezultati dobijeni ispitivanjem, za odnos mešanja 1:10.000 prikazani su u tabelama 24-26.

Tabela 24. Rezultati dobijeni nakon mešanja 2 kg materijala u mešalici, za različita vremena mešanja

Broj uzorka	Broj cestica u uzorku				
	1 min	2 min	3 min	4 min	5 min
Uzorak 1	1520	958	590	550	471
Uzorak 2	850	901	551	528	560
Uzorak 3	692	830	540	510	520
Uzorak 4	620	594	550	523	510
Uzorak 5	538	500	580	501	450
Uzorak 6	471	450	564	499	480
Uzorak 7	195	221	550	502	500
Uzorak 8	80	220	368	489	501
Uzorak 9	25	195	339	490	472
Uzorak 10	3	126	360	420	520
BROJ PODATAKA	10	10	10	10	10
STEPENI SLOBODE	8	8	8	8	8
SREDNJA VREDNOST	499.40	499.50	499.20	501.20	498.40
STANDARDNA DEVIJACIJA +/-	466.49	312.68	100.41	34.20	31.62
KOEF. VARIJACIJE, % +/-	93.41	62.60	20.11	6.82	6.34
KOEF. VARIJACIJE (POISSON),	4.47	4.47	4.48	4.47	4.48
c² (CHI-SQUARE) =	3921.71	1761.64	181.76	21.00	18.06
VEROVATNOĆA, % =	0.00	0.00	0.00	0.715	2.079

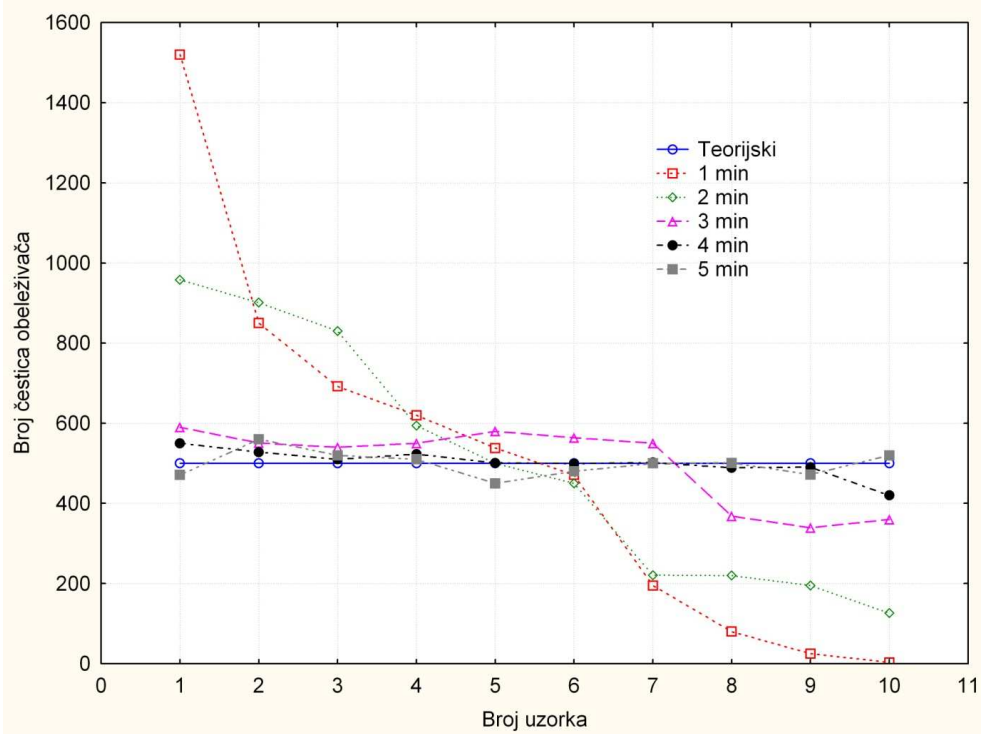
Tabela 25. Rezultati dobijeni nakon mešanja 1.5 kg materijala u mešalici, za različita vremena mešanja

Broj uzorka	Broj cestica u uzorku				
	1 min	2 min	3 min	4 min	5 min
Uzorak 1	1225	645	423	390	370
Uzorak 2	632	611	410	378	360
Uzorak 3	599	568	380	360	353
Uzorak 4	552	406	350	352	355
Uzorak 5	321	400	364	322	361
Uzorak 6	183	345	364	362	380
Uzorak 7	120	199	350	372	386
Uzorak 8	45	196	368	389	385
Uzorak 9	19	200	339	390	372
Uzorak 10	6	126	360	375	365
BROJ PODATAKA	10	10	10	10	10
STEPENI SLOBODE	8	8	8	8	8
SREDNJA VREDNOST	370.20	369.60	370.80	369.00	368.70
STANDARDNA DEVIJACIJA +/-	386.79	189.64	26.75	21.18	11.96
KOEF. VARIJACIJE, % = +/-	104.48	51.31	7.21	5.74	3.24
KOEF. VARIJACIJE (POISSON),	5.20	5.20	5.19	5.21	5.21
c² (CHI-SQUARE) =	3637.02	875.76	17.37	10.94	3.49
VEROVATNOĆA, % =	0.00	0.00	2.65	20.526	89.968

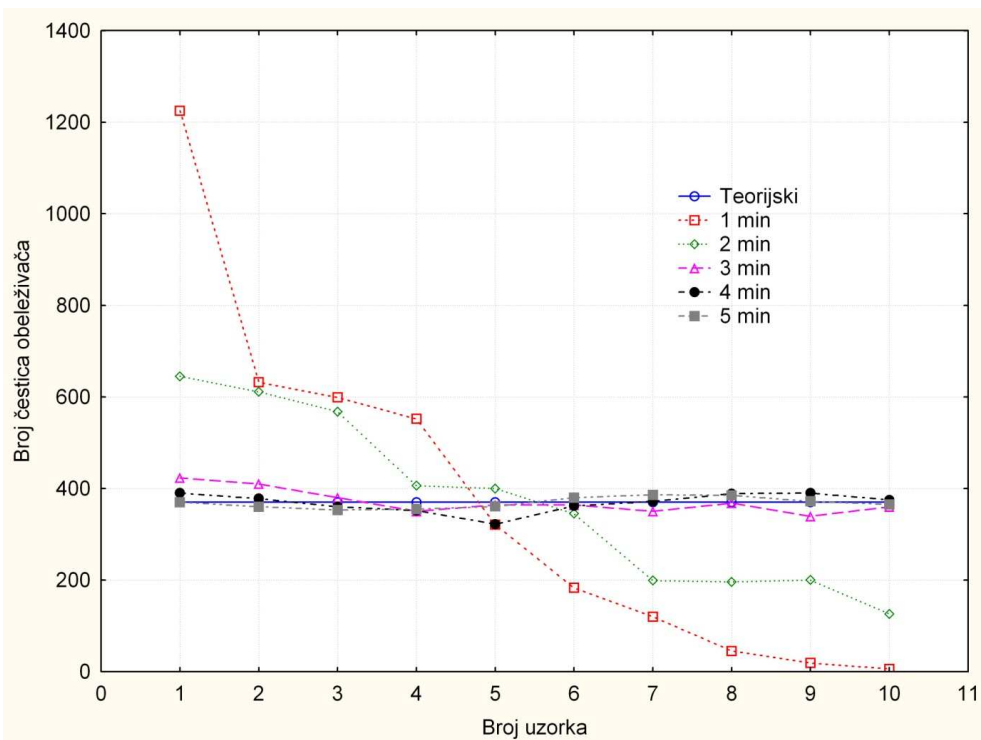
Tabela 26. Rezultati dobijeni nakon mešanja 1 kg materijala u mešalici, za različita vremena mešanja

Broj uzorka	Broj cestica u uzorku				
	1 min	2 min	3 min	4 min	5 min
Uzorak 1	1100	365	242	228	240
Uzorak 2	404	340	264	252	250
Uzorak 3	321	300	264	250	252
Uzorak 4	220	251	244	252	260
Uzorak 5	189	244	266	244	242
Uzorak 6	125	240	240	250	252
Uzorak 7	85	202	230	248	240
Uzorak 8	40	200	268	258	260
Uzorak 9	15	188	230	260	250
Uzorak 10	10	165	240	244	246
BROJ PODATAKA	10	10	10	10	10
STEPENI SLOBODE	8	8	8	8	8
SREDNJA VREDNOST	250.90	249.50	248.80	248.60	249.20
STANDARDNA DEVIJACIJA +/-	325.86	66.53	15.12	8.90	7.32
KOEF. VARIJACIJE, % = +/-	129.88	26.66	6.08	3.58	2.94
KOEF. VARIJACIJE (POISSON),	6.31	6.33	6.34	6.34	6.33
c² (CHI-SQUARE) =	3808.87	159.65	8.27	2.87	1.93
VEROVATNOĆA, % =	0.00	0.00	40.754	94.250	98.301

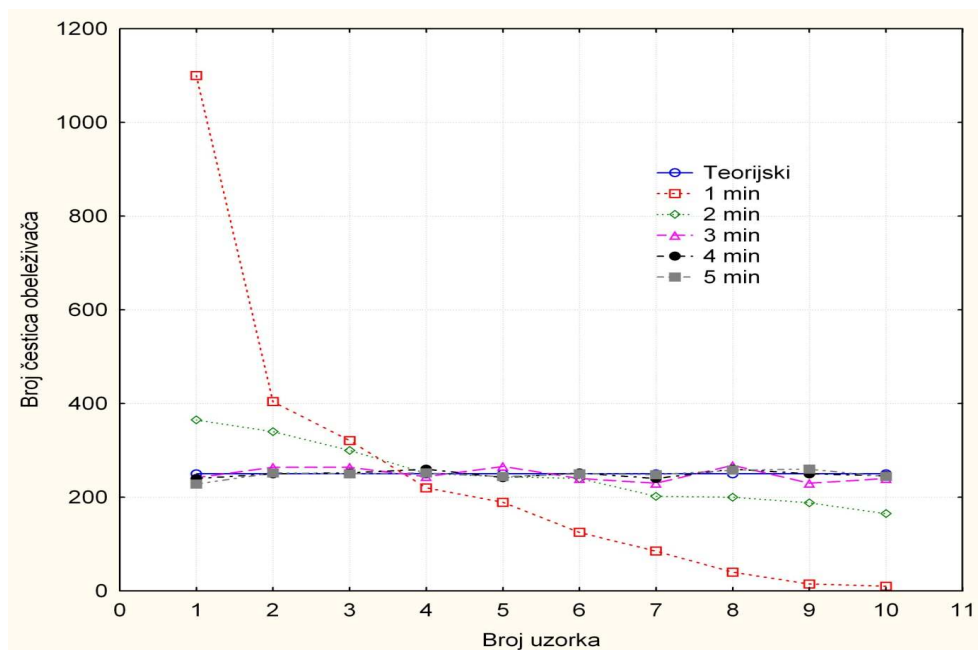
Upoređenjem rezultata dobijenih eksperimentalno i teorijskih vrednosti, dobijene su krive prikazane na slikama 44-46.



Slika 44. Rezultati ispitivanja vremena mešanja sa količinom materijala od 2 kg



Slika 45. Rezultati ispitivanja vremena mešanja sa količinom materijala od 1.5 kg



Slika 46. Rezultati ispitivanja vremena mešanja sa količinom materijala od 1 kg

Mehanizam kretanja čestica unutar mešalice, opisan matematičkim modelom, potvrđen je i u ispitivanjima sa različitim koeficijentom ispunjenosti mešalice i različitim vremenom mešanja. Na osnovu rezultata, uočljivo je da je sa većom ispunjenosti mešalice (2 kg ili 60%) nije moguće postići zadovoljavajući stepen izmešanosti čak ni sa 5 minuta mešanja. Kod manje količine materijala (1 i 1.5 kg), moguće je zadovoljiti ovaj kriterijum već kod vremena od 3 minuta sa 1 kg materijala i 4 minuta kod 1.5 kg materijala. Ova činjenica je u skladu sa literaturnim navodima i pređašnjim ispitivanjima koja se odnose na uticaj koeficijenta ispunjenosti mešalice na stepen homogenosti (Alhwaige *et al.*, 2007).

Nešto drugačiji rezultati su postignuti primenom metode gde se koncentracija obeleživača određuje spektrofotometrijski. Kod ovakvog način određivanja koncentracije radi se o obeleživaču sa daleko većim brojem čestica po gramu (>1.000.000), pri čemu je raspodela po zapremini smeše bolja, a postignut je i odnos mešanja 1:100.000. Homogenost materijala je izražena preko koeficijenta varijacije. Rezultati dobijeni spektrofotometrijskom metodom su prikazani u tabelama 27-29.

Tabela 27. Rezultati spektrofotometrijske metode analize homogenosti na količini materijala od 2 kg

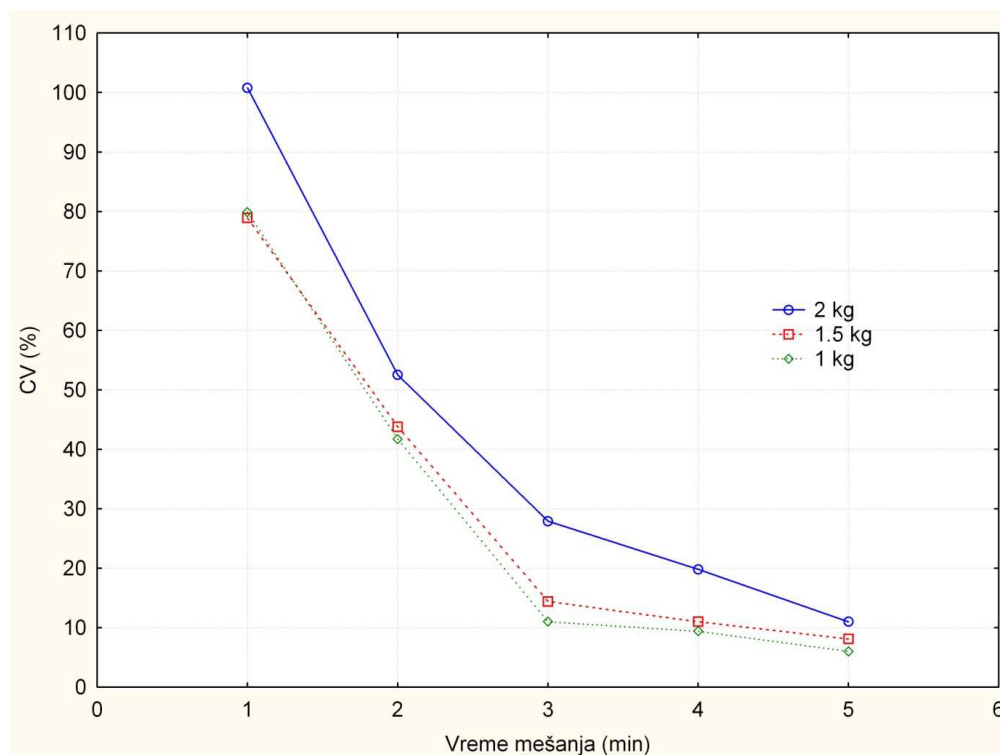
	1 min	2 min	3 min	4 min	5 min
1	0.865	0.711	0.630	0.528	0.471
2	0.752	0.695	0.562	0.487	0.423
3	0.702	0.525	0.531	0.452	0.452
4	0.540	0.505	0.510	0.436	0.402
5	0.336	0.465	0.486	0.401	0.398
6	0.125	0.450	0.452	0.365	0.390
7	0.096	0.235	0.347	0.348	0.378
8	0.002	0.213	0.350	0.340	0.365
9	0.000	0.185	0.320	0.300	0.372
10	0.000	0.102	0.241	0.301	0.320
Srednja vrednost	0.342	0.409	0.443	0.396	0.397
St. devijacija	0.34	0.21	0.12	0.08	0.04
Koef. varijacije	100.8	52.5	27.9	19.8	11.0

Tabela 28. Rezultati spektrofotometrijske metode analize homogenosti na količini materijala od 1.5 kg

	1 min	2 min	3 min	4 min	5 min
1	0.786	0.696	0.555	0.333	0.309
2	0.703	0.654	0.549	0.370	0.320
3	0.654	0.538	0.521	0.322	0.298
4	0.623	0.517	0.496	0.335	0.294
5	0.462	0.449	0.435	0.300	0.288
6	0.178	0.442	0.505	0.305	0.293
7	0.123	0.350	0.466	0.292	0.269
8	0.096	0.311	0.397	0.278	0.248
9	0.084	0.145	0.381	0.299	0.264
10	0.052	0.162	0.379	0.247	0.262
Srednja vrednost	0.376	0.426	0.468	0.308	0.285
St. devijacija	0.30	0.19	0.07	0.03	0.02
Koef. varijacije	78.9	43.8	14.4	11.0	8.1

Tabela 29. Rezultati spektrofotometrijske metode analize homogenosti na količini materijala od 1 kg

	1 min	2 min	3 min	4 min	5 min
1	0.559	0.366	0.198	0.158	0.167
2	0.424	0.320	0.174	0.142	0.145
3	0.409	0.278	0.170	0.142	0.154
4	0.311	0.200	0.168	0.138	0.159
5	0.115	0.206	0.165	0.129	0.150
6	0.125	0.156	0.163	0.129	0.139
7	0.101	0.147	0.158	0.128	0.164
8	0.096	0.189	0.155	0.127	0.160
9	0.078	0.112	0.139	0.125	0.146
10	0.055	0.110	0.136	0.112	0.162
Srednja vrednost	0.227	0.208	0.163	0.133	0.155
St. devijacija	0.18	0.09	0.02	0.01	0.01
Koef. varijacije	79.9	41.7	11.0	9.4	6.0

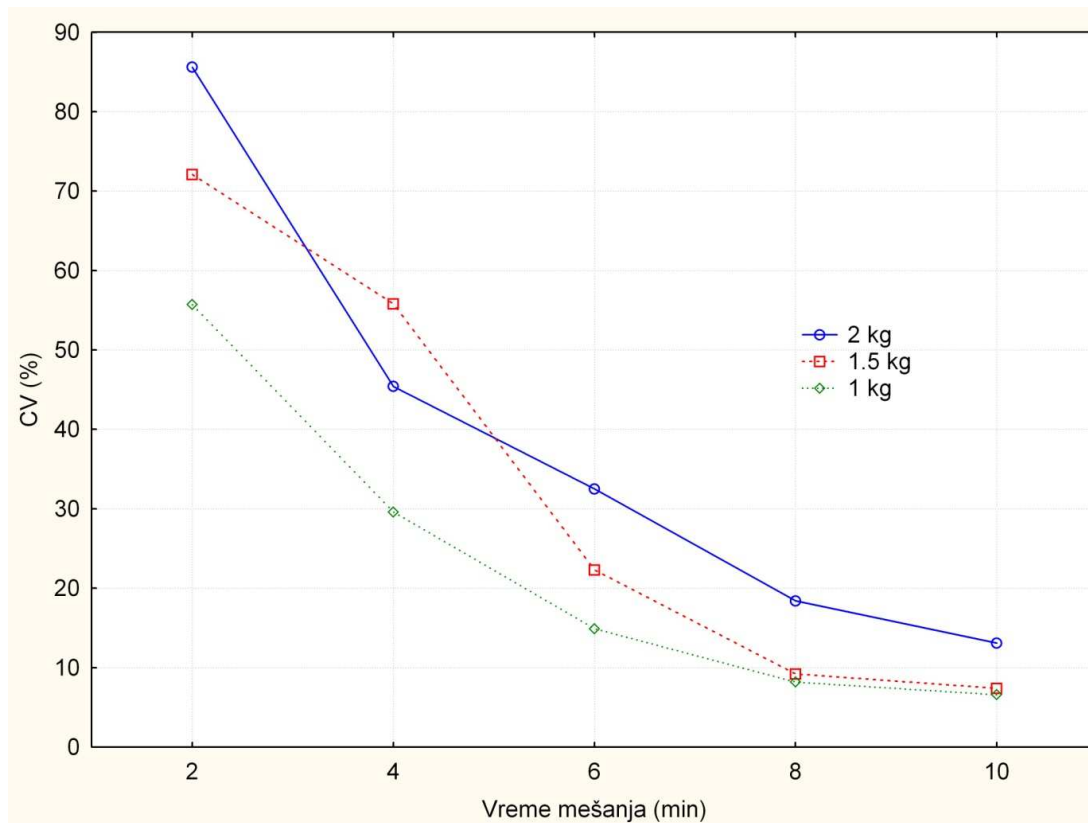


Slika 47. Zavisnost koeficijenta varijacije od vremena mešanja, za različite količine materijala

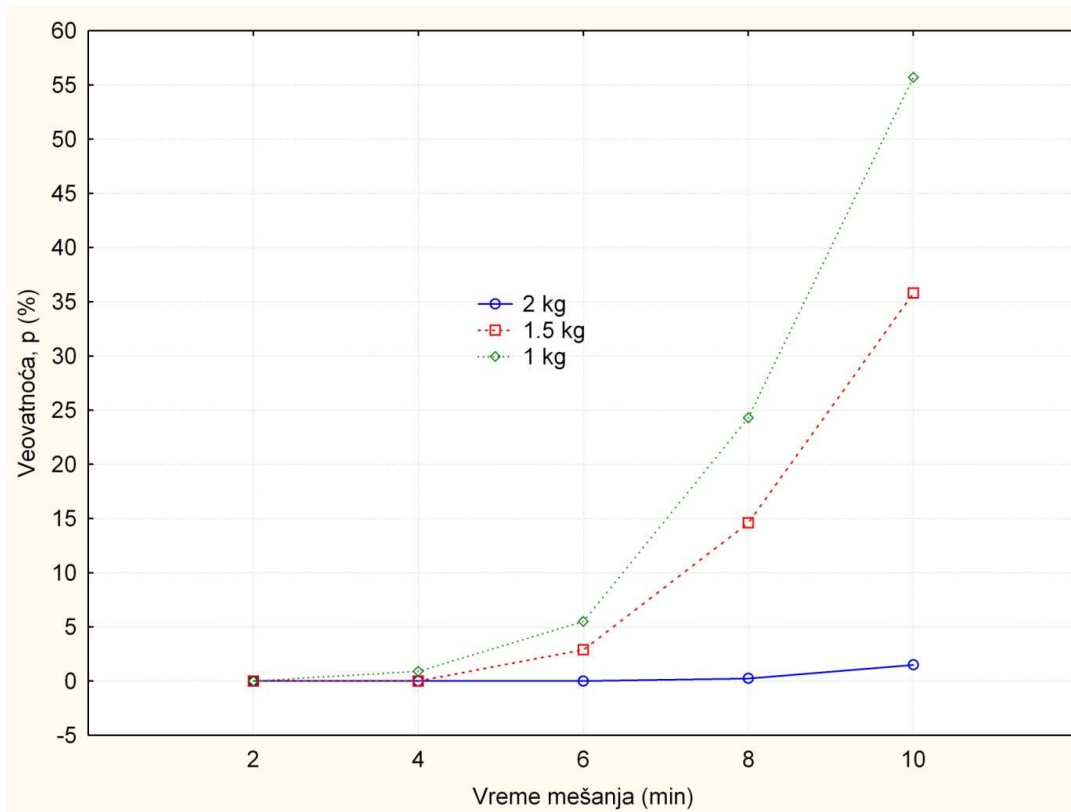
Homogenost materijala izražena preko koeficijenta varijacije, postignuta je u mešalici sa 1 kg materijala za 4 minuta, a u mešalici sa 1.5 kg materijala za 5

minuta. Međutim, kao što je i metoda sa tačkicama pokazala, u slučaju ispunjenosti mešalice sa 2 kg materijala, homogenost nije postignuta ni za 5 minuta koliko je trajalo mešanje (slika 47).

Obzirom da je broj obrtaja mešalice iznosio 50 o/min za prvu seriju ispitivanja, urađeni su i eksperimenti sa manjim brojem obrtaja. Rezultati dobijeni za 30 o/min se razlikuju samo u dužini vremena mešanja koje je potrebno za postizanje homogenosti ali ne i generalno u modelu ponašanja čestica. Vreme neophodno za postizanje homogenosti sa različitim nivoima punjenja mešalice, dobijeno spektrofotometrijskom metodom prikazano je na slici 48.



Slika 48. Zavisnost koeficijenta varijacije od vremena mešanja i koeficijenta ispunjenosti mešalice na 30 o/min (spektrofotometrijska metoda)

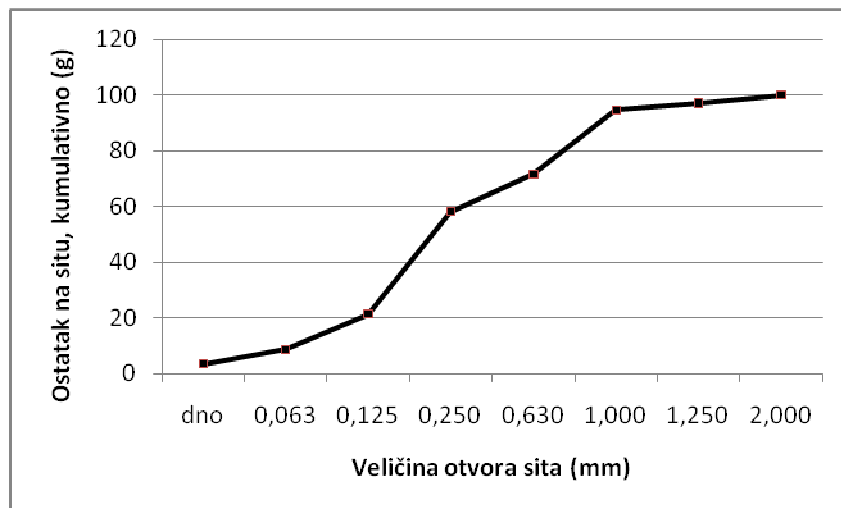


Slika 49. Zavisnost verovatnoće (verovatnoća) od vremena mešanja i koeficijenta ispunjenosti mešalice na 30 o/min (metoda sa tačkicama)

4.8.3 Rezultati dobijeni za industrijsku mešalicu

Matematički model za cilindričnu mešalicu je pokazao dobro slaganje sa eksperimentalnim rezultatima kao i sa istraživanjima drugih autora, prikazanih u literaturi (*Habbache et al., 2002; Bertrand et al., 2005; Kwapinska et al., 2006; Ammarcha et al., 2009*) Obzirom da je u praktičnim uslovima, u industriji, situacija daleko složenija, urađen je i eksperiment u pogonu za proizvodnju hrane za životinje na mešalici kapaciteta 50 kg koja služi kao mešalica za predmešanje, kod proizvodnje premiksa. Mešalica je identične konstrukcije kao i laboratorijska, a komponente koje su mešane su imale granulometrijski profil prikazan na slici 50.

Kako se može videti na slici 36, najveći udeo čestica je u rasponu od 0.630 do 0.125 milimetara (najveći ostatak na situ 0.250 mm). Ovo se donekle razlikuje od granulometrijskog profila materijala korištenog u laboratoriji (kukuruzno brašno) ali je generalno, raspodela čestica veoma ujednačena.



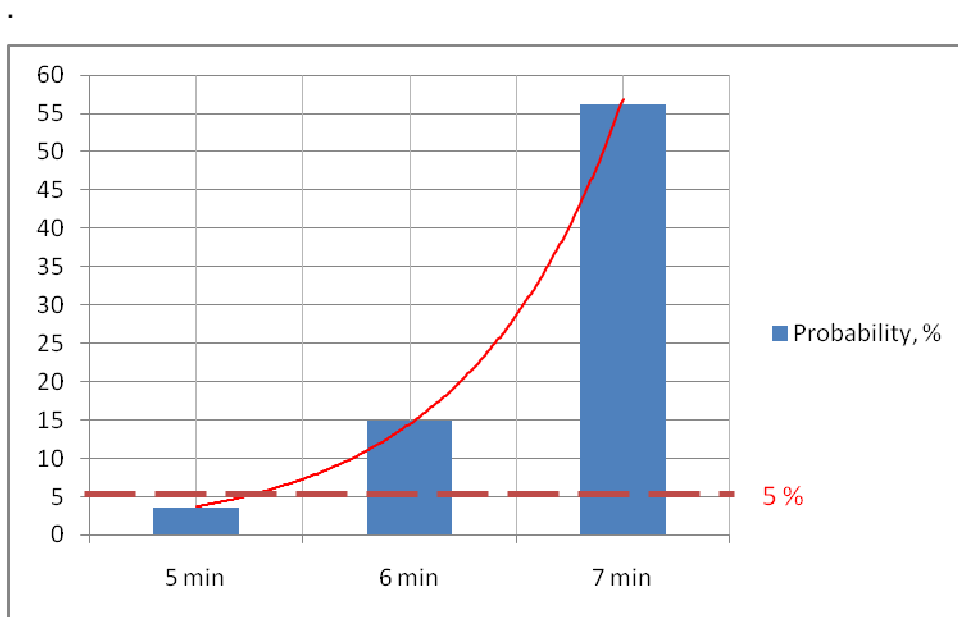
Slika 50. Kumulativna kriva za granulometrijski sastav ispitane smeše

Nakon dodatog trejsera (F blue, red i green), od kojih je svaki reprezentovao jedno vreme mešanja, dobijeni su sledeći rezultati (Tabela 11):

Tabela 30. Rezultati ispitivanja homogenosti

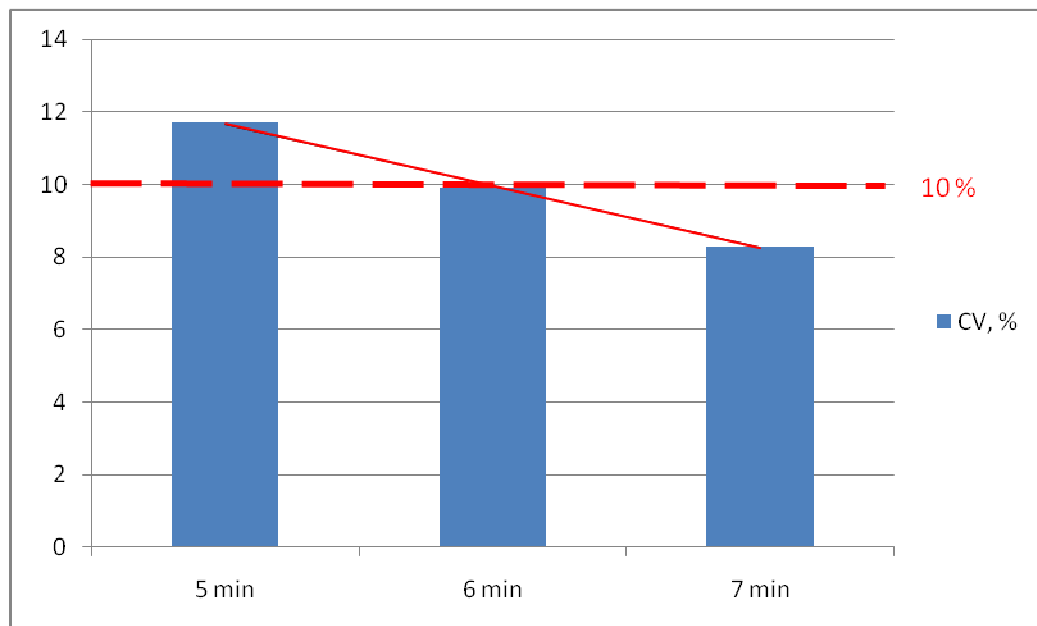
Broj uzorka	Broj čestica obeleživača		
	F red (5 min)	F green (6 min)	F blue (7 min)
Uzorak 1	252	260	223
Uzorak 2	271	235	246
Uzorak 3	256	212	257
Uzorak 4	199	254	230
Uzorak 5	270	228	258
Uzorak 6	254	255	245
Uzorak 7	253	248	233
Uzorak 8	263	223	252
Uzorak 9	231	266	221
Uzorak 10	243	257	240
BROJ PODATAKA	10	10	10
STEPENI SLOBODE	8	8	8
SREDNJA VREDNOST =	249.20	243.80	240.50
STANDARDNA DEVIJACIJA= +/-	21.29	18.10	13.39
KOEF. VARIJACIJE, % = +/-	8.54	7.42	5.57
KOEF. VARIJACIJE (POISSON), % = +/-	6.33	6.40	6.45
c² (CHI-SQUARE) =	16.37	12.09	6.71
VEROVATNOĆA, % =	3.74	14.72	56.79

Na osnovu podataka iz tabele i kriterijuma za homogenost (vrednost verovatnoća), može se videti da je homogenost postignuta za vreme mešanja od 6 minuta. Za vreme od 5 minuta, vrednost Verovatnoća je u intervalu za koji se ne može izvesti zaključak o homogenosti ($1 < p < 5\%$), ali je bliža gornjoj granici ovog intervala. Razmatrajući vrednosti za vreme mešanja od 6 i 7 minuta, pretpostavka je da bi homogenost mogla biti postignuta u vremenu između 5 i 6 minuta, što je u skladu sa dobijenim matematičkim modelom (slika 51).



Slika 51. Zavisnost verovatnoće kao kriterijuma homogenosti od vremena mešanja

Sličan rezultat je dobijen i sa spektrofotometrijskom metodom, gde je postignut CV <10%, za 6 minuta, odnosno između 5 i 6 minuta (slika 52).

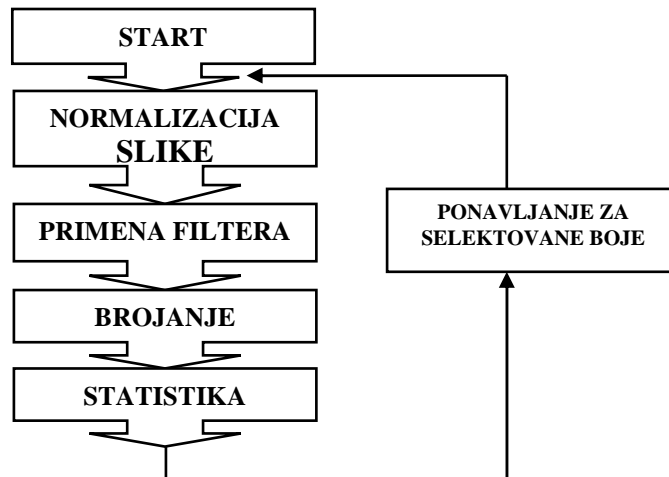


Slika 52. Zavisnost CV (%) od vremena mešanja

Međutim, koeficijet varijacije za homogenost pri odnosu mešanja 1:100.000, pokazuje da je za ispitana vremena nemoguće ispuniti kriterijum $CV < 5\%$. Ove vrednosti ukazuju na to da je neophodno produžiti vreme mešanja, ukoliko se odnos mešanja povećava

4.9 Rezultati ispitivanja programa za brojanje tačkica

Softver za određivanje broja tačkica analizom slike je razvijen korišćenjem C # programskog jezika i zasnovan je na algoritmu prikazan na slici 53:



Slika 53. Algoritam programa za brojanje tačkica

Algoritam kompjuterskog programa za brojanje tačkica je imao sledeće tehničke specifikacije:

Start-inicijacija i startovanje programa. Korisnik bira sliku za analizu i unosi podatke kao što su boja trejsera, količina materijala, količina trejsera, itd.

Normalizacija slike- program prolazi kroz sliku i „traži“ piksele koji ne odgovaraju opsegu izabrane boje. Ovi pikseli se brišu i njihova boja se menja u belu;

Primena filtera: kao rezultat normalizacije (prethodni korak algoritma), generiše se slika sa tačkicama trejsera. Ukoliko tačkice nisu ujednačene boje, uz pomoć tzv. „blur“ filtera popunjavaju se „rupe“ kako bi se generisale tačkice zatvorenih i ujednačenih kontura. Nakon toga, slika se konvertuje u crno-belu, gde intenzitet boje

zavisi od prethodnog koraka. Sve tačkice koje su slabog intenziteta, odnosno koje ne potiču od trejsera, uz pomoć binarnog filtera se uklanjaju;

Brojanje: brojanje tačkica se odvija prolaskom programa kroz sliku u dva koraka – u prvom koraku, program zaokružuje tačkice bojom koja se razlikuje od boje tačkice (npr. plave tačkice sa crvenom, crvene sa plavom). U sledećem koraku, program prepoznaje zatvorene konture i broji ih.

Statistika: u finalnom koraku obavlja se statistička obrada podataka.

Rezultati brojanja čestica *Microtracer-a* F grupe, se analiziraju kao Poisson-ova distribucija. Kriterijum za dobru homogenost ili uniformnost smeše, izražen je preko verovatnoće P (Verovatnoća) za χ^2 (CHI SQUARE) statistiku, gde su vrednosti analize varijanse veće nego za čistu Poisson-ovu distribuciju.

Eksperimentalni uslovi u pogledu količine dodatog trejsera i očekivanog broja čestica u uzorku su prikazani u tabeli 31.

Tabela 31. Šema uzorkovanja i broj očekivanih čestica trejsera u uzorku

Broj šarže	1	2	3
Masa Uzorka	100g	75g	50g
Broj čestica Microtracer-a u uzorku	125	94	63

Rezultati dobijeni ručnim i kompjuterskim brojanjem su prikazani u tabeli 32.

Tabela 32. Rezultati dobijeni ručnim i kompjuterskim brojanjem čestica obeleživača

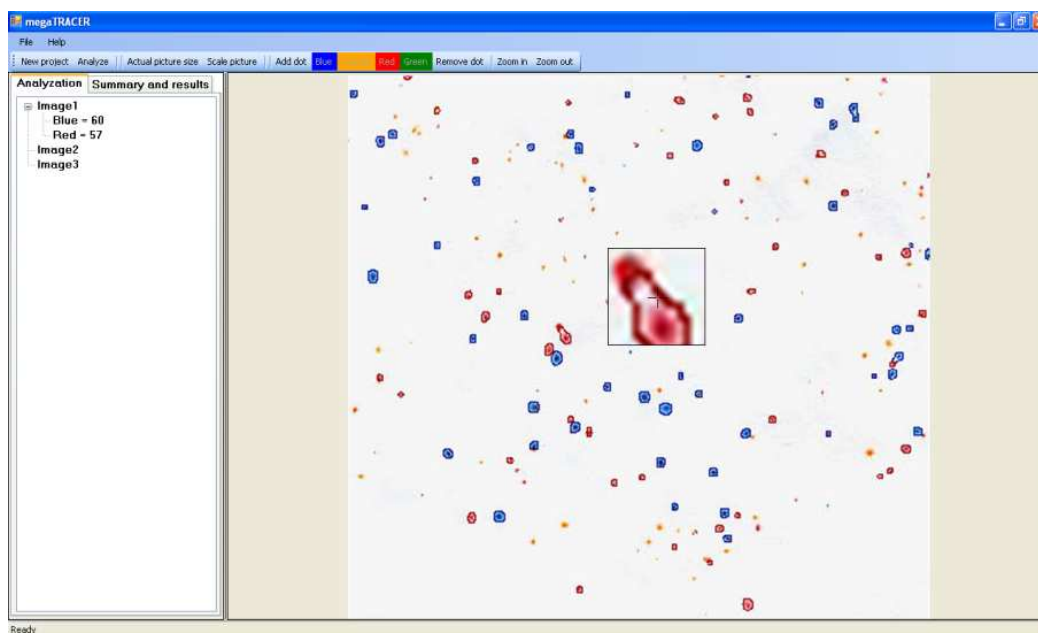
Broj uzorka	Broj čestica trejsera u uzorku*					
	Broj šarže (ručno izbrojano)			Broj šarže (kompjuterski izbrojano)		
	1	2	3	1	2	3
1	130	96	66	128	95	65
2	152	84	65	152	83	67
3	123	93	59	123	95	59
4	140	79	56	142	80	56
5	112	72	65	115	75	66
6	136	85	63	136	86	62
7	114	85	62	114	85	62
8	150	79	71	149	77	72
9	154	91	80	155	95	80
10	126	94	60	125	95	64
11	120	86	88	119	85	87
12	120	85	60	121	85	59
13	113	86	55	113	85	55
14	125	80	59	125	79	59
15	134	77	56	136	76	55
16	132	93	66	133	92	67
17	120	89	66	119	90	67
18	113	100	63	114	100	62
19	116	99	58	115	99	60
20	140	91	59	140	90	59
Sadržaj trejsera, %	102.8	93.76	101.35	102.96	92.93	101.83
Verovatnoća, %	8.73	82.97	35.48	8.45	80.17	37.69

*rezultati su iskazani kao srednja vrednost 3 ponavljanja

U svim serijama, rezultati su ukazali na veoma dobru distribuciju trejsera i na osnovu kriterijuma za homogenost, vrednosti verovatnoće su veće od 5%, što znači da je homogenost postignuta. Sadržaj trejsera (tracer recovery) je u svim slučajevima relativno dobar. Varijacije u sadržaju su normalne, jer se i broj čestica Microtracer®-a po gramu, razlikuje u zavisnosti od serije proizvodnje ali se kreće u granicama od $\pm 10\%$. Ove razlike nisu uticale na tačnost rezultata, jer je najveći uticaj imala distribucija čestica, a ne njihov broj.

Takođe, postojale su male razlike u vrednosti između verovatnoće ručno i kompjuterski izbrojanih čestica ali ni to nije uticalo na konačne rezultate, jer su sve

vrednosti bile u okvirima predviđenim za dobru homogenost. U pojedinim slučajevima se dešavalo da program izbroji manje čestica nego što je to slučaj kod ručnog brojanja. Kada postoje mesta gde su čestice isuviše blizu jedna druge, program ih prepoznaje kao jednu konturu (tačkicu) i ova pojava se može smatrati kao mana programa. Kada se čestice dodiruju, program ne može da prepozna sve tačkice sa 100% verovatnoće. U nekim slučajevima, kao što je prikazano na slici 3. kada se dve čestice kombinuju u jednu veću tačku, program izračunava samo jednu česticu. Ovaj nedostatak je rešen vizuelnim pregledom slike (slika 54) i korekcijom na mestima gde su čestice veoma blizu jedne drugima. U bilo kom trenutku, moguće je ispitati celu skeniranu sliku i izvršiti ispravke ručno tako što se klikom kompjuterskog miša na neprepoznatu česticu, ona definiše kao nova čestica i na taj način dodaje u sistem. Takođe, ukoliko program prepozna neku tamniju mrlju na papiru (kao što su npr. fleke ili šare) kao česticu, moguće ih je obrisati jednostavnim klikom miša na tom mestu. Svaka promena u broju čestica inicira novo preračunavanje u programu.

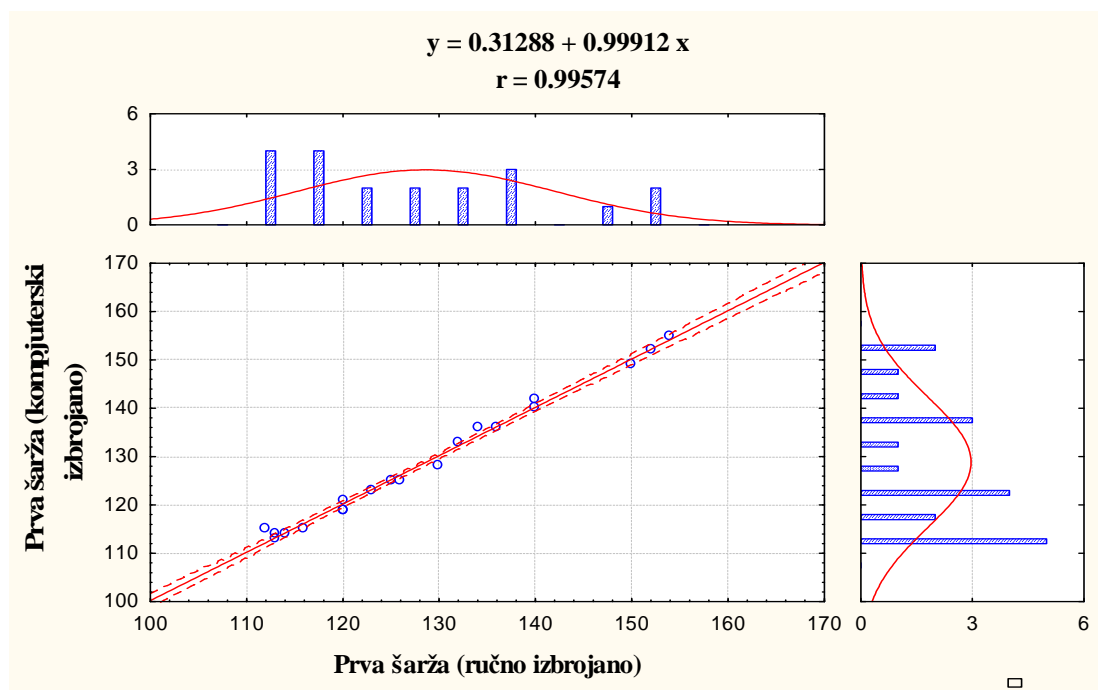


Slika 54. Izgled skenirane filter hartije

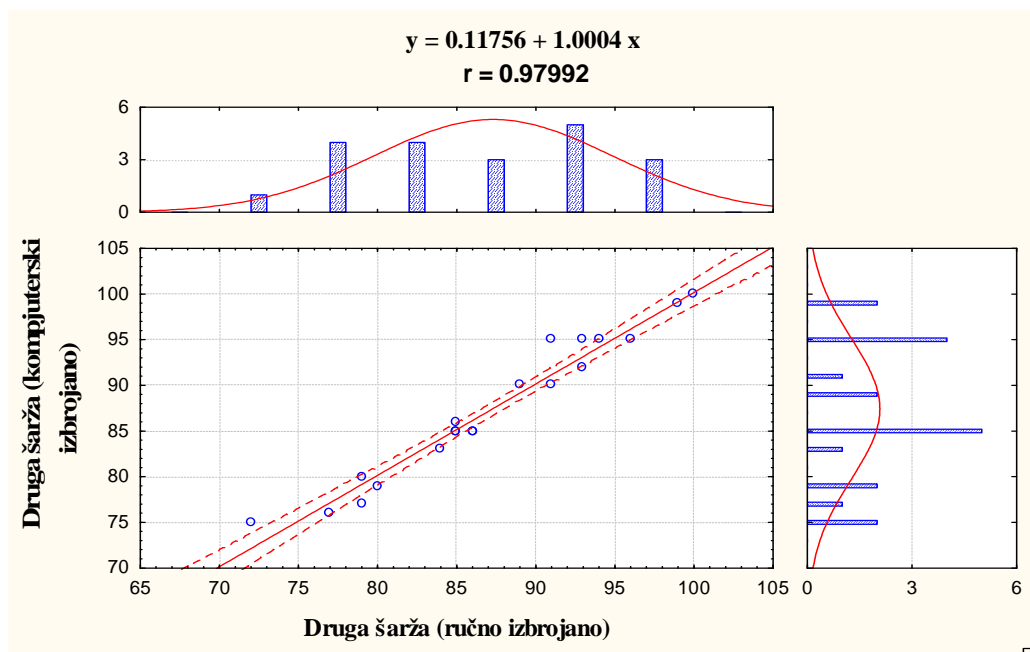
Važna prednost ovog programa je skraćeno vreme za analizu. Prosečno vreme potrebno za ručno brojanje je između 5 i 15 minuta, u zavisnosti od broja tačkica. Korišćenjem programa, ceo postupak traje 2-3 minuta, uključujući i

skeniranje i obradu slike, a on takođe uklanja mogućnost grešaka u ručnom brojanju zbog zamora operatera.

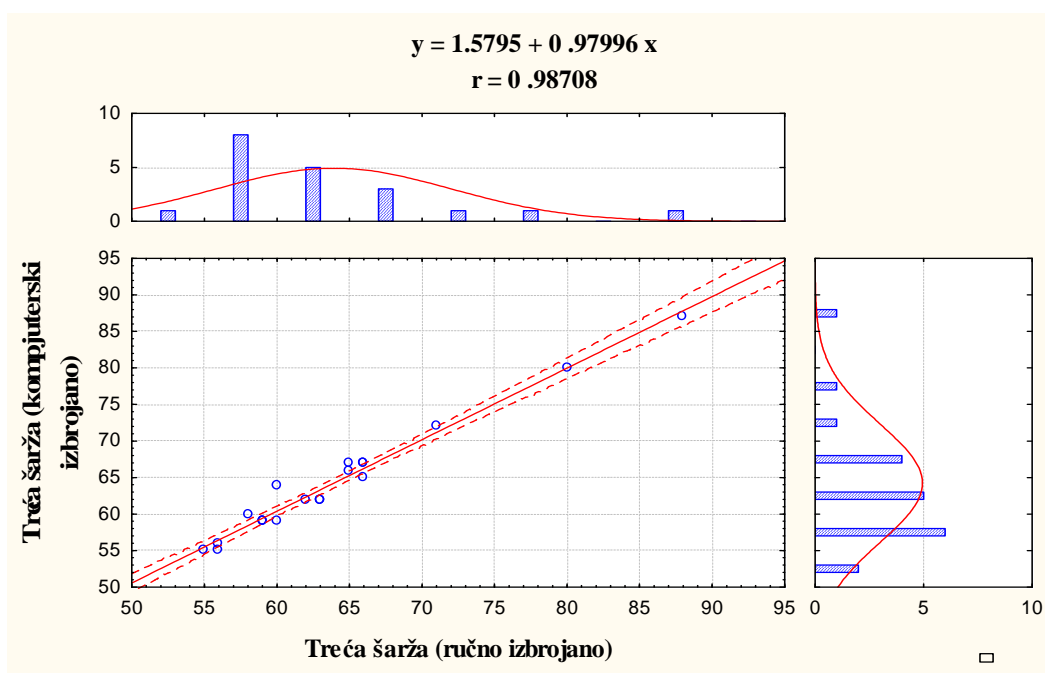
Statističkom analizom i poređenjem rezultata dobijenih ručnim i kompjuterskim brojanjem čestica, utvrđena je pozitivna korelacija između ove dve metode. Koeficijent korelacije (r) je 0,995 za prvu šaržu, 0,979 za drugu i 0,987 za treću šaržu. Korelacija između ručnog i kompjuterskog brojanja čestica za sve tri ispitivane šarže, sa jednačinama regresije, prikazana je na slici 50 (a, b, c).



a



b



c

Slika 55. Dijagrami korelacije između ručnog i kompjuterskog brojanja tačkica

Slični, pozitivni rezultati su dobijeni u prethodnom istraživanju sa Microtracerom F grupe plave boje, a planira se ispitivanje mogućnosti da se program osposobi

za simultano prepoznavanje i brojanje tačaka različitih boja. Ovim modifikacijama bi se omogućila brža analiza homogenosti praškastih materijala za različita vremena mešanja u jednoj šarži, gde bi svaka boja reprezentovala jedno vreme mešanja.

5. ZAKLJUČCI

Na osnovu rezultata dobijenih u eksperimentima, mogu se izvesti sledeći zaključci:

Vertikalna mešalica

1. Kukuruz koji je korišten u eksperimentima i koji je samleven na mlinu čekićaru sa izmenom sita od 2, 3 i 4 mm imao je ujednačenu vlagu koja se kretala u granicama od 11.05-12.1 %. Ove granice su bile u skladu sa zahtevima Pravilnika o kvalitetu hrane za životinje 4/2010.
2. Kukuruz samleven na situ od 2 mm nije mogao biti upotrebljen za eksperimente zbog loših protočnih karakteristika i zasvođavanja tokom mešanja (ugao nasipanja $42,7^{\circ}$, indeks sabijanja 21,05 i hausnerov odnos 1,26)
3. Kukuruz samleven na sitima 3 i 4 mm je imao slične karakteristike u pogledu granulacije, nasipne mase i ugla nasipanja, što se manifestovalo i u rezultatima dobijenim nakon mešanja u mešalici.
4. Kod originalne konstrukcije mešalice i kukuruza samlevenog na situ 4 mm, homogenost je postignuta nakon 12 minuta za odnos mešanja 1:10.000 sa koeficijentom varijacije 9,5%, dok je za odnos mešanja 1:100.000 to bilo nemoguće postići ni nakon 15 minuta mešanja (CV= 9,1%).
5. Sa kukuruzom granulacije 3 mm, homogenost je za odnos mešanja 1:10.000 bila na granici kriterijuma za dobru homogenost (CV=10,1%), dok za odnos mešanja 1:100.000 i vreme od 15 minuta nije bilo moguće postići odgovarajuću homogenost (CV=9,5%).
6. Izmenom na konstrukciji mešalice, odnosno zamenom obloge pužnice sa 13,5% perforacija, za odnos mešanja 1:10.000 i granulaciju kukuruza 4 mm, vreme mešanja je skraćeno za 15% (sa 12 minuta na 10 minuta) pri čemu je

postignut koeficijent varijacije 9,4%, Isti koeficijent varijacije je postignut za isto vreme i kod kukuruza od 3 mm.

7. Kod odnosa mešanja 1:100.000 došlo je do poboljšanja stepena izmešanosti i smanjenja koeficijenta varijacije kod obe granulacije kukuruza ali homogenost nije postignuta (CV= 8,9% i 9,3%).
8. Sa oblogom koja je imala 27% perforacija za odnos mešanja 1:10.000 i granulaciju 4 mm, vreme mešanja je skraćeno za još 2 minuta (na 8 minuta), što u odnosu na originalnu konstrukciju mešalice iznosi 30%. Postignuti su koeficijenti varijacije 9,3% za kukuruz od 4 mm i 9,9% za kukuruz 3mm.
9. Homogenost kod odnosa mešanja 1:100.000 kod ove konfiguracije mešalice nije bila zadovoljavajuća ni posle 15 minuta mešanja ali su koeficijenti varijacije za kukuruz 4 mm i 3mm smanjeni i iznosili su 8,6 i 8,7%.
10. Najbolji učinak je postignut kod izmene obloge sa 40% perforacija gde je vreme mešanja za odnos 1:10.000 smanjeno za 50% u odnosu na prvobitnu konstrukciju mešalice i iznosilo je 6 minuta. Za ovo vreme, postignuti su koeficijenti varijacije od 10,2% za kukuruz 4mm i 10,7% za kukuruz 3 mm, dok je sa produženjem mešanja koeficijent dostigao vrednost 5,2% (12 minuta) što predstavlja koeficijent varijacije koji odgovara stepenu mešanja kod horizontalnih mešalica.
11. Kod odnosa mešanja 1:100.000 postignut je minimalni koeficijent varijacije od 6,6% za kukuruz 4mm, odnosno 8,8% za kukuruz 3 mm, za 15 minuta mešanja, što je nedovoljno da bi se postigla zadovoljavajuća homogenost.
12. Izmene na konstrukciji su dovele do poboljšanja mešanja, smanjenja vremena neophodnog za postizanje homogenosti, a samim tim i do uštede energije potrebne za rad ove mešalice.

Cilindrična mešalica

1. Matematički model za cilindričnu mešalicu, sa matricom tranzicionih verovatnoća, pokazao je dobra slaganja sa podacima dobijenim u laboratorijskim eksperimentima.
2. Verovatnoće $p=0,9$ i $r=0,5$ su za ovaj model mešalice pokazala najbolja slaganja sa eksperimentalnim podacima.
3. Broj obrtaja mešalice je uticao na vreme neophodno da se postigne homogenost.
4. Nivo ispunjenosti mešalice sa materijalom značajno utiče na rezultate. Ukoliko nivo ispunjenosti ove mešalice prelazi 50%, nije moguće postići homogenost.
5. U ovakvom tipu mešalice, sa parametrima $p=0,9$ i $r=0,5$ je moguće postići zadovoljavajuću homogenost pri odnosu mešanja 1:10.000, dok za odnos 1:100.000 to nije moguće ($CV>5\%$).
6. Matematički model je pokazao primenjivost i u industrijskim uslovima na mešalici kapaciteta 50 kg, sa veoma malim odstupanjima, za oba odnosa mešanja 1:10.000 i 1:100.000.
7. Vreme neophodno za homogenizaciju materijala u ovoj mešalici iznosi 5 minuta za material koji ima ujednačenu veličinu čestica, odnosno najveći procenat čestica između 200 i 600 mikrona.

Program za brojanje tačkica

1. Program za brojanje tačkica Microtracer[®]-a, pokazao je dobra slaganja sa ručnim brojanjem tačkica.
2. Utvrđeni su visoki koeficijenti korelacije između ove dve metode (0,995 za prvu šaržu, 0,979 za drugu i 0,987 za treću šaržu).
3. Broj tačkica u uzorku nije bitnije uticao na rezultate analize slike.

6. LITERATURA

- [1] A .Realpe, C. Velaszquez, Image processing and analysis for determination of concentrations of powder mixtures, *Powder Technology* 134 (2003) 193– 200.
- [2] Ingram A., J.P.K. Seville, D.J. Parker, X. Fan, R.G. Forster, Axial and radial dispersion in rolling mode rotating drums, *Powder Technology* 158 (2005), 76 – 91.
- [3] A.-L. Le Coent, A. Rivoire, S. Briancon, J. Lieto, An original image-processing technique for obtaining the mixing time: The box-counting with erosions method, *Powder Technology* 152 (2005) 62–71.
- [4] Alexander, F.J. Muzzio, T. Shinbrot, Effects of scale and inertia on granular banding segregation, *Granular Matter* 5 (4), (2004), 171–175.
- [5] Alexander, F.J. Muzzio, T. Shinbrot, Segregation patterns in V-blenders, *Chemical Engineering Science* 58 (2) ,(2003), 487–496.
- [6] Almahdi Atteya Alhwaige, Siti Masrinda Tasirin, Wan Ramli Wan Daud, Experimental Study on the Mixing of binary Polymer Particles in Different Types of Mixers, *Journal of Applied Sciences* 7(15), (2007), 2200-2205.
- [7] Ammarcha, C.Gatumel1, J.L Dirion, M. Cabassud , V. Mizonov And H. Berthiaux, Powder Flow Dynamics In A Continuous Mixer Operating In Semi Batch Mode, 8th World Congress Of Chemical Engineering, New Materials & Processes, august 23-27, Montreal, Canada, 2009.
- [8] Andreas S.L. Mendez, Gláucia de Carli, Cássia V. Garcia, Evaluation of powder mixing operation during batch production: Application to operational qualification procedure in the pharmaceutical industry, *Powder Technology* 198 (2010), 310–313.

- [9] Anon.: Technical Information, Products for the Feed Industry, BASF, Aktiengesellschaft, Ludwigshafen, Germany, (2002).
- [10] Aoun-Habbache, M. Aoun, H. Berthiaux, V. Mizonov, An experimental method and a Markov chain model to describe axial and radial mixing in a hoop mixer, *Powder Technology* 128, (2002), 159–167.
- [11] Arlet, Sabine: Information About Micro Tracer, Micro Tracers Services Europe, (2001).
- [12] ASAE S303, Test Procedure for Solids-Mixing Equipment for Animal Feeds, 2005.
- [13] ASAE Standards 2003, 50th Ed.: 589–592. St. Joseph, MI: ASAE, (2004).
- [14] ASTM B527-06, Standard Test Method for Determination of Tap Density of Metallic Powders and Compounds
- [15] ASTM C29 / C29M - 09 Standard Test Method for Bulk Density ("Unit Weight") and Voids in Aggregate
- [16] B. Daumann, H. Nirschl, Assessment of the mixing efficiency of solid mixtures by of image analysis, *Powder Technology* 182 (2008) 415–423.
- [17] B.F.C. Laurent, J. Bridgwater, D.J. Parker, Convection and segregation in a horizontal mixer, *Powder Technology* 123 (2002) 9–18.
- [18] Baxter J., H. Abou-Chakra, U. Tüzün, Fellow and B. Mills Lamptey, A DEM simulation and experimental strategy for solving fine powder flow problems, *Chemical Engineering Research & Design* 78 (A7), (2000), 1019–1025.

- [19] Bellamy, A. Nordon, D. Littlejohn, Non-invasive monitoring of powder mixing with near infrared spectrometry and acoustics, *Spectroscopy Europe* (2004), 30–32.
- [20] Berthiaux, K. Marikh, Modeling Continuous Powder Mixing by of the Theory of Markov Chains, *Particulate Science and Technology* 22, (2004), 379–389.
- [21] Berthiaux, V. Mosorov, L. Tomczak, C. Gatumel, J.F. Demeyre, Principal component analysis for characterising homogeneity in powder mixing using image processing techniques, *Chem. Eng. Sci.* 45, (2006), 397–403.
- [22] Bertrand, L.A. Leclaire, G. Levecque, DEM-based models for the mixing of granular materials, *Chemical Engineering Science* 60 (8–9), (2005), 2517–2531.
- [23] Bodhisattwa Chaudhuri, Amit Mehrotra, Fernando J. Muzzio, M. Silvina Tomassone, Cohesive effects in powder mixing in a tumbling blender, *Powder Technology* 165 (2006), 105–114.
- [24] Bulent Koç, H. Silleli, C.Koç, ZM. Dayioglu, Monitoring of Dry Powder Mixing With Real-Time Image Processing, *Journal of Applied Sciences* 7 (8) (2007) 1218-1223.
- [25] C. Yan, Y. Fan, C. Lu, Y. Zhang, Y. Liu, R. Cao, J. Gao, C. Xu, Solids mixing in a fluidize bed riser, *Powder Technology*, 193 (2009) 110-119.
- [26] C.F. Ferraris, Concretemixingmethods and concretemixers: state of the art, *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology* 106 (2), (2001), 391–399.
- [27] Carson J.W., Royal T.A., Goodwill D.J.: Understanding and eliminating particle segregation problems, *Bulk solid handling*, Vol.6, (1986), 139-144.

- [28] Chaudhuri, A. Mehrotra, F.J. Muzzio, M.S. Tomassone, Cohesive effects in powder mixing in a tumbling blender, *Powder Technol.* 165, (2006), 105–114.
- [29] Chaudhuri Bodhisattwa, Amit Mehrotra, Fernando J. Muzzio and M. Silvina Tomassone, Cohesive effects in powder mixing in a tumbling blender, *Powder Technology* 165 (2), (2006), 105–114.
- [30] D. Geldart, E. C. Abdullah, A. Hassanpour, L. C. Nwoke, I. Wouters, Characterization Of Powder Flowability Using Measurement Of Angle Of Repose, *China Particuology* Vol. 4, Nos. 3-4, 104-107, 2006
- [31] D. V. Khakhar, J. J. McCarthy, J. F. Gilchrist, J. M. Ottino, Chaotic mixing of granular materials in two-dimensional tumbling mixers, *Chaos*, 9(1), (1999), 195-205.
- [32] D. Wei, R. Dave and R. Pfeffer, Mixing and characterization of nanosized powders: An assessment of different techniques, *Journal of Nanoparticle Research* 4 (2002) 21–41.
- [33] D.A Eisenberg, The use of Microtracers™ F (colored uniformly sized iron particles) in coding the presence of coccidiostats in poultry feeds practical implications, *Archiva Zootechnica* (1998) 46-50.
- [34] D.Eisenberg, Measuring mixer variation - performance and cross-contamination validation, 16th Annual ASA-IM SEA Feed Technology and Nutrition Workshop, Singapur (2008).
- [35] D.R. Van Puyvelde, B.R. Young, M.A. Wilson, S.J. Schmidt, Experimental determination of transverse mixing kinetics in a rolling drum by image analysis, *Powder Technology* 106, (1999), 183–191.
- [36] Dartevelle S., W. I. Rose, J. Stix, K. Kelfoun, and J. W. Vallance, Numerical modeling of geophysical granular flows: 1. A comprehensive approach to

- granular rheologies and geophysical multiphase flows, *Geochemistry Geophysics Geosystems* 5 (8), (2004), 1–28.
- [37] Denis Ponomarev, Markov models for mixing of powders in static mixers, Doctoral thesis, L'institut National Polytechnique De Toulouse, 2006.
- [38] Denis Ponomarev, Vadim Mizonov, Henri Berthiaux, Cendrine Gatumel, Janos Gyenis, Elena Barantseva, A 2D Markov chain for modelling powder mixing in alternately revolving static mixers of Sysmix® type, *Chemical Engineering and Processing* 48 (2009), 1495–1505.
- [39] Dennis R. Van Puyvelde, Simulating the mixing and segregation of solids in the transverse section of a rotating kiln, *Powder Technology* 164 (2006), 1–12.
- [40] E. Paul, V. Atlemo-Obeng, S. Kresta, Handbook of industrial mixing -Science and practice (2004), A. John Willey&Sons Inc.
- [41] F. Bertrand, L.-A. Leclaire, G. Levecque, DEM-based models for the mixing of granular materials, *Chemical Engineering Science* 60 (2005), 2517 – 2531 .
- [42] F. Dal Grande, A. Santomaso, P. Canu, Improving local composition measurements of binary mixtures by image analysis, *Powder Technology* 187 (2008), 205–213.
- [43] F. Podczeck, (1998) in *"Particle-particle Adhesion in Pharmaceutical Powder Handling"* Imperial College Press, London, p108.
- [44] Fang S. Lai and Liang T. Fan, Application of a Discrete Mixing Model to the Study of Mixing of Multicomponent Solid Particles, *Ind. Eng. Chern., Process Des. Dev.*14(4), (1975), 403-411.

- [45] Feed Manufacturing Technology, Appendix C, Determining and Expressing Particle Size, Second Edition, AFIA inc., 2005.
- [46] G.I. Tardos, S. McNamara, I. Talu, Slow and intermediate flow of a frictional bulk powder in the Couette geometry, *Powder Technology* 131 (1), (2003), 23–39.
- [47] Grasa, J.C. Abanades, A calibration procedure to obtain solid concentrations from digital images of bulk powders, *Powder Technology* 114 (1–3) (2001), 125–128.
- [48] H. Berthiaux, K. Marikh, V. Mizonov, D. Ponomarev, E. Barantzeva, Modeling Continuous Powder Mixing by the Theory of Markov Chains, *Particulate Science and Technology*, 22: 379–389, 2004
- [49] H. Berthiaux, V. Mosorov, L. Tomczak C. Gatumel, J.F. Demeyre, Principal component analysis for characterising homogeneity in powder mixing using image processing techniques, *Chemical Engineering and Processing* 45 (2006) 397–403
- [50] H.H. Hausner, (1967) *Int J Powder Metall.* **3**, 7-13
- [51] H.P. Kuo, P. C. Knight, D. J. Parker, Y. Tsuji, M. J. Adams and J. P. K. Seville, The influence of DEM simulation parameters on the particle behaviour in a V-mixer, *Chemical Engineering Science* 57 (17), (2002), 3621–3638.
- [52] Hales, K.E., Cole, N.A., Leytem, A.B., Galyean, M.L. 2009. Crude protein, ash, phosphorus, neutral detergent fiber and starch concentrations in particle size distributions of corn steam flaked to varying bulk densities [abstract]. 2009 Plains Nutrition Council Spring Conference, April 9-10, 2009, San Antonio, Texas. Texas AgriLife Research & Extension Pub. No. AREC 09-18. p. 94.

- [53] Hans G. M. Dotsch, Paul M. J. Van Den Hof, Test for Local Structural Identifiability of High-order Non-linearly Parametrized State Space Models, *Automatica*, 22 (6), (1996), 875-883.
- [54] Harnby, An engineering view of pharmaceutical powder mixing, *Pharmaceutical Science & Technology Today* 3 (9), (2000), 303–309.
- [55] Heidenreih, E., Strauch, W.: Critical Determinants for Solid Substance Mixing Processes in Compound Feed Production (part I), *Krafftutter/ Feed Magazine*, 6(2000), 248-256.
- [56] Heidenreih, E., Strauch, W.: Decisive Factors for Solids Mixing (part II), *Krafftutter/ Feed Magazine*, 7-8 (2000), 286-292.
- [57] Henri Berthiaux, Vadim Mizonov, Applications of Markov Chains in Particulate Process Engineering: A Review, *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, Vol. 82, (2004), 1143-1168.
- [58] Henri Berthiaux, Vadim Mizonov, Vladimir Zhukov, Application of the theory of Markov chains to model different processes in particle technology, *Powder Technology* 157, (2005), 128 – 137.
- [59] Hongming Li: Impact of cohesion forces on particle mixing end segregation, *Disertation, University of Pittsburg*, 2002.
- [60] Ippolito, L. Samson, S. Bourlès, J.-P. Hulin, Diffusion of a single particle in a 3D random packing of spheres, *Eur. Phys. J. E*, 3(3), (2000), 227 – 236.
- [61] Isabel Figueroa, Hongming Li, Joseph McCarthy, Predicting the impact of adhesive forces on particle mixing and segregation, *Powder Technology* 195 (2009), 203–212.

- [62] J.J. McCarthy, Micro-modeling of cohesive mixing processes, *Powder Technology* 138 (2003), 63– 67.
- [63] J.J. McCarthy, T. Shinbrot, G. Metcalfe, J.E. Wolf, J.M. Ottino, Mixing of granular materials in slowly rotated containers, *AIChE Journal* 42 (12), (1996), 3351–3363.
- [64] J.-M. Aiache, E. Beissac, Powders as dosage forms, *Encyclopedia of Pharmaceutical Technology*, Informa Healthcare, London, 2006.
- [65] James K. Prescott and Roger A. Barnum, “On Powder Flowability,” *Pharmaceutical Technology*, (2009)
- [66] Janos Szepvolgyi Jr., Ernesto Diaz, Janos Gyenis, New stochastic modelling of mixing in process operations, *Chemical Engineering and Processing* 38 (1999) 1–9.
- [67] Joseph J. McCarthy, Devang V. Khakhar, Julio M. Ottino, Computational studies of granular mixing, *Powder Technology* 109 , (2000), 72–82.
- [68] K. Marikh, H. Berthiaux, C. Gatumel, V. Mizonov, E. Barantseva, Influence of stirrer type on mixture homogeneity in continuous powder mixing: a model case and a pharmaceutical case, *Chem. Eng. Res. Des.* 86, (2008), 1027–1037.
- [69] K. Marikh, H. Berthiaux, V. Mizonov, E. Barantseva, Experimental study of the stirring conditions taking place in a pilot plant continuous mixer of particulate solids, *Powder Technology* 157 (2005), 138 – 143.
- [70] K. Marikh, H. Berthiaux, V. Mizonov, E. Barantseva, D. Ponomarev: Flow Analysis And Markov Chain Modelling To Quantify The Agitation Effect In A Continuous Powder Mixer, *Chemical Engineering Research and Design*, 84(A11), (2006), 1059–1074.

- [71] Kaye H. Brian: Powder Mixing, Chapman & Hall, 276 pages, 1997.
- [72] L. Obregon, C. Velazquez, Discrimination limit between gray values for the prediction of powder concentrations, Powder Technology 175 (1), (2007) 8–13.
- [73] L. Obregon, et al., Mixing of granular materials, Part I: Effect of periodic shear. Powder Technology 197 (1–2), (2010), 9–16.
- [74] L. Pernenkil, C.L. Cooney, A review on the continuous blending of powders, Chem. Eng. Sci. 61, (2006), 720–742.
- [75] L. T. Fan, F. S. Lai, Y. Auao, K. Shinoda And E. Yoshizawa, Numerical And Experimental Simulation Studies On The Mixing Of Particulate Solids And The Synthesis Of A Mixing System - Mixing Process And Stochastic Motion Of Mutually Noninteracting Particles, Computers and Chemical Engineering 2, (1978), 19-32.
- [76] L.J. Bellamy, A. Nordon, D. Littlejohn, Effects of particle size and cohesive properties on mixing studied by non-contact NIR, Int. J. Pharm. 361, (2008), 87–91.
- [77] Lakshman Pernenkil, Charles L. Cooney, A review on the continuous blending of powders, Chemical Engineering Science 61 (2006) 720 – 742.
- [78] M. Kwapinska, G. Saage, E. Tsotsas, Mixing of particles in rotary drums: A comparison of discrete element simulations with experimental results and penetration models for thermal processes, Powder Technology 161 (2006), 69 – 78.

- [79] M. Moakher, T. Shinbrot, F.J. Muzzio, Experimentally validated computations of flow, mixing and segregation of non-cohesive grains in 3D tumbling blenders, *Powder Technology* 109, (2000), 58–71.
- [80] M.H. Cooke, J. Bridgwater, The simulation of a particle disperser, *Powder Technology* 33 (1982) 239–247.
- [81] Martin Dyer and Catherine Greenhill, On Markov Chains for Independent Sets, *Journal of Algorithms* 35, (2000)17-49.
- [82] Muzzio, F. J., Shinbrot, T., & Glasser, B. J., Powder Technology in the pharmaceutical industry: The need to catch up fast. *Powder Technology* 132, (2002), 1–7.
- [83] N. Asmar, P. A. Langston, A. J. Matchett, A generalised mixing index in distinct element method simulation of vibrated particulate beds, *Granular Matter* 4, (2002), 129–138.
- [84] N. Barashkov, D.Eisenberg, S. Eisenberg, J. Mohnke, Ferromagnetic microtracers and their use in feed applications, Presentation available on www.microtracers.com
- [85] Nienow A.W., Edwards M.F., Harnby N.: *Mixing in Process Industries*, Chapter 1-3, 1-23, 1992.
- [86] Norman Harnby, An engineering view of pharmaceutical powder mixing, *PSTT* 3, (9), (2000), 303-309.
- [87] O. Djuragic, Determination of working accuracy in feed manufacturing process by different methods, M.Sc.A Thesis, University of Novi Sad, Faculty of Technology (2006).

- [88] O. Djuragic, J. Levic, S. Sredanovic, Lj. Levic, Evaluation of homogeneity in feed by method of Microtracers®, *Archiva Zootechnica* 12 (4) (2009) 85-91.
- [89] O.J.Corrigan, M.L. Wilkinson, J.Ryan, K. Harte, O.F. Corrigan, The use of Microtracer in a Medicated Premix to Determine the Presence of Tiamulin in Final Feed, *Drug Development and Industrial Pharmacy*, 20 (8) (1994) 1503-1509.
- [90] O.S. Sudah, D. Coffin-Beach, F.J. Muzzio, Quantitative characterization of mixing of free-flowing granular material in tote (bin)-blenders, *Powder Technology* 126 (2), (2002), 191–200.
- [91] P. M. Clark, K. C. Behnke, and D. R. Poole, Effects of Marker Selection and Mix Time on the Coefficient of Variation (Mix Uniformity) of Broiler Feed, *Journal Of Applied Poultry Research* 16 (2007) 464-470.
- [92] P.E. Arratia, et al., A study of the mixing and segregation mechanisms in the Bohle Tote blender via DEM simulations, *Powder Technology* 164 (1), (2006), 50–57.
- [93] P.E. Arratia, Nhat-hang Duong, F.J. Muzzio, P. Godbole, S. Reynolds, A study of the mixing and segregation mechanisms in the Bohle Tote blender via DEM simulations, *Powder Technology* 164 (2006), 50–57.
- [94] P.M.C. Lacey, A.C.G.I., D.I.C., *The Mixing of Solid States*, Institution of chemical engineers, 21, (1943), 53.
- [95] P.M.C. Lacey, Developments in the theory of particle mixing, *Journal of Applied Chemistry* 4 (5), (1954), 257-268.
- [96] P.W. Cleary, G. Metcalfe, K. Liffman, How well do discrete element granular flow models capture the essentials of mixing process?, *Applied Mathematical Modelling* 22, (1998), 995–1008.

- [97] Patricia M. Portillo & Fernando J. Muzzio, Marianthi G. Ierapetritou, Using Compartment Modeling to Investigate Mixing Behavior of a Continuous Mixer, J Pharm Innov, DOI 10.1007/s12247-008-9036-0.
- [98] Patricia M. Portillo, Fernando J. Muzzio, Marianthi G. Ierapetritou , Characterizing powder mixing processes utilizing compartment models, International Journal of Pharmaceutics 320 (2006), 14–22.
- [99] Patricia M. Portillo, Marianthi G. Ierapetritou, Fernando J. Muzzio, Effects of rotation rate, mixing angle, and cohesion in two continuous powder mixers—A statistical approach, Powder Technology 194 (2009), 217–227.
- [100] Patricia M. Portillo, Marianthi Ierapetritou, Silvina Tomassone, Christine Mc Dade, Donald Clancy, Petrus P. C. Avontuur, Fernando J. Muzzio, Quality by Design Methodology for Development and Scale-up of Batch Mixing Processes, J Pharm Innov (2008) 3:258–270
- [101] Patricia Maribel Portillo, Quality By Design For Continuous Powder Mixing, Doctoral thesis, Graduate School-New Brunswick - Rutgers, The State University of New Jersey, 2008.
- [102] R.H.Wang, L.T. Fan, Axial mixing of grains in a motionless Sulzer (Koch) mixer, Industrial & Engineering Chemistry-Process Design & Development 15 (3), (1976), 381–388.
- [103] R.H.Wang, L.T. Fan, Stochastic modelling of segregation in a motionless mixer, Chemical Engineering Science 32, (1977), 695–701.
- [104] R.L. Carr, (1965) *Chem Eng.* **72**, 163-168

- [105] Realpe, C. Velazquez, Image processing and analysis for determination of concentrations of powder mixtures, *Powder Technology* 134 (3), (2003) 193–200.
- [106] Ruey H. Wang and L. T. Fan, Axial Mixing of Grains in a Motionless Sulzer (Koch) Mixer, *Ind. Eng. Chem., ProcessDes. Dev.* 15 (3), (1976), 382-388.
- [107] S. G. McNeill, S. A. Thompson, M. D., Effect of moisture content and broken kernels on the bulk density and packing of corn, *Montross Applied Engineering in Agriculture*. Vol. 20(4): 475-480, 2004
- [108] S. Tallon, C.E. Davies, In-situ monitoring of axial particle mixing in a rotating drum using bulk density measurements, *Powder. Technol.* 186, (2008), 22–30.
- [109] S.B. Zhang, V. Sernas, Incompressible model of solids conveying in a single-screw extruder, *Journal of Reinforced Plastics and Composites* 21 (15), (2002), 1399–1409.
- [110] S.J. Chen, L.T. Fan, C.A. Watson, The mixing of solids particles in a motionless mixer—A stochastic approach, *AIChE Journal* 18 (5), (1972), 984–989.
- [111] S.K. Hajra, D.V. Khakhar, Radial mixing of granular materials in a rotating cylinder: experimental determination of particle self-diffusivity, *Physics of Fluids* 17 (1), (2005) 013101.
- [112] S.S. Manickam, R. Shah, J. Tomei, T.L. Bergman, B. Chaudhuri, Investigating mixing in a multi-dimensional rotary mixer: Experiments and simulations, *Powder Technology* 201 (2010), 83–92.
- [113] Sandra Massol-Chaudeur, Henri Berthiaux, John A. Dodds, Experimental study of the mixing kinetics of binary pharmaceutical powder mixtures in a

- laboratory hoop mixer, *Chemical Engineering Science* 57 (2002), 4053 – 4065.
- [114] Sandra Massol-Chaudeur, Henri Berthiaux, Servando Muerza, John Dodds, A numerical model to identify the structure of a high-dilution powder mixture, *Powder Technology* 128 (2002), 131– 138.
- [115] Santomaso, M. Olivi, P. Canu, Mixing kinetics of granular materials in drums operated in rolling and cataracting regime, *Powder Technology* 152 (2005), 41– 51.
- [116] Simo Siiriä, Jouko Yliruusi, Determining a value for mixing: Mixing degree, *Powder Technology* 196 (2009), 309–317
- [117] Stark, C.R., K.C. Behnke, R.D. Goodband, and J.A. Hansen, 1991. On-Farm Feed Uniformity Survey. Swine Day Report of Progress No. 641, AES, Kansas State University, Manhattan.
- [118] STATISTICA V. 9.0, Statsoft, (2009).
- [119] Stephen Tallon, Clive E. Davies, In-situ monitoring of axial particle mixing in a rotating drum using bulk density measurements, *Powder Technology* 186 (2008), 22–30.
- [120] Swarbrick J., Boylan J.C., *Encyclopedia of Pharmaceutical Technology*, Vol. 5, 501 pages, 2001.
- [121] T. Elperin, A. Vikhansky, Granular flow in a rotating cylindrical drum, *Europhysics Letters* 42 (6), (1998), 619–623.
- [122] Tae Gon Kang and Tai Hun Kwon, Colored particle tracking method for mixing analysis of chaotic micromixers, *J. Micromech. Microeng.* 14 (2004), 891–899.

- [123] V. F. Pershin and Yu. T. Selivanov, Modeling of the Mixing of Particulate Materials in Continuous-Circulating Mixers, *Theoretical Foundations of Chemical Engineering* 37(6), (2003), 590–595.
- [124] Wicker, D.L. and D.R. Poole, 1991. How is Your Mixer Performing? *Feed Management*, 42(9):40, 43.
- [125] Wightman, F.J. Muzzio, Mixing of granular material in a drum mixer undergoing rotational and rocking motions. I. Uniform particles, *Powder Technology* 98 (2), (1998) 113–124.
- [126] Zagrodnij V. V., Effect of technological characteristics of powder material on the fluorescence intensity of elemental analytical lines, *X-Ray Spectrom.*(2003), 32: 40–45
- [127] Behnke K.C., C. Fahrenholz, E.J.Bortone, Sylvan Eisenberg, W.G.Dominy, Feed Mixing and Mixer Testing of Shrimp Feed, *Proceedings of the Special Session on Shrimp Feed, World Aquaculture Society, Baton Rouge, LA USA, (1992), 206-211.*
- [128] Behnke K. C., A perspective on mixing and mix uniformity, *Feed Technology - Technical Report, American Soybean Association, (2006), 56-62.*
- [129] Goodband, R.D., Improving on-farm mixing efficiency, *Swine Day, Manhattan, KS, November 15, (1990), 14-18.*
- [130] www.energomix.com
- [131] www.feedmachinery.com