



UNIVERZITET U NOVOM SADU

Tehnološki fakultet

**SIMULACIJA PROCESA KRETANJA ČESTICA PRI TRANSPORTU U  
STATIČKIM MEŠALICAMA I MODIFIKOVANIM PUŽNIM TRANSPORTERIMA  
PRIMENOM METODE DISKRETNIH ELEMENATA**

DOKTORSKA DISERTACIJA

Mentor: Prof. dr Ljubinko Lević

Kandidat: mr Aca Jovanović

Novi Sad, 2015 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 Aca P. Jovanović, dipl.inž.maš
Mentor (titula, ime, prezime, zvanje): MN	Prof. dr Ljubinko Lević, redovni profesor
Naslov rada: NR	SIMULACIJA PROCESA KRETANJA ČESTICA PRI TRANSPORTU U STATIČKIM MEŠALICAMA I MODIFIKOVANIM PUŽNIM TRANSPORTERIMA PRIMENOM METODE DISKRETNIH ELEMENATA
Jezik publikacije: JP	srpski, latinica
Jezik izvoda: JI	srp. / eng.
Zemlja publikovanja: ZP	Republika Srbija
Uže geografsko područje:	AP Vojvodina

UGP	
Godina: GO	2015
Izdavač: IZ	autorski reprint
Mesto i adresa: MA	Bulevar cara Lazara 1, Novi Sad

Fizički opis rada: FO	6 poglavlja, 135 strana, 18 tabela, 66 slika, 170 literaturnih navoda
Naučna oblast: NO	Prehrambeno inženjerstvo, Projektovanje tehnoloških procesa
Naučna disciplina: ND	Tehnologija hrane za životinje
Predmetna odrednica, ključne reči: PO	Statička mešalica, Pužni transporter, CFD, DEM analiza, putanja čestica, optimizacija, vreme mešanja
UDK	
Čuva se: ČU	Biblioteka Tehnološkog fakulteta
Važna napomena: VN	
Izvod:	<p>Kvalitetno mešanje praškastih materijala, čestica ili granula je od izuzetnog inženjerskog, energetskog, ekonomskog i ekološkog značaja u raznim granama industrije: prehrambenoj, procesnoj, hemijskoj, farmaceutskoj industriji. Efikasnost mešanja, dizajn opreme i parametri procesa mešanja imaju značajan uticaj na kvalitet i cenu poluproizvoda ili finalnog proizvoda.</p> <p>U ovoj tezi, prikazana je upotreba metode diskretnih elemenata (DEM) na modelovanje mešanja granula i/ili praškastih materijala (granulisani zeolit ili kukuruzna prekrupa) u različitim konfiguracijama statičkih mešaća Komax i Ross, kao i za modifikovane pužne transportere / predmešalice. Primenjen je i metod računске dinamike fluida (CFD) za modelovanje protoka</p>

fluida u Ojlerovom višefaznom modelu, za predviđanje ponašanja čestica unutar različitih konfiguracija statičkih mešalica.

Ispitivano je petnaest horizontalnih pužnih transportera sa nepromenljivog koraka, sa modifikovanom geometrijom, različitih dužina pužnice, sa dodatnim elementima na pužnoj spirali, radi istraživanja mogućnosti mešanja granulisanog materijala, tokom transporta materijala (granulisani zeolit).

Rezultati matematičkog modeliranja i numeričke simulacije su upoređeni sa odgovarajućim eksperimentalnim rezultatima na osnovu stepena pomešanosti mešavine, primenom kriterijuma relativne standardne devijacije (RSD). Zahvaljujući ovde postavljenim modelima moguće je uraditi optimizaciju geometrije i parametara sistema mešanja uzimajući u obzir kvalitet procesa mešanja i cenu finalnog proizvoda.

Datum prihvatanja teme od strane NN veća: DP	14.11.2014
Datum odbrane: DO	

Članovi komisije: (ime i prezime / titula / zvanje / naziv organizacije / status)	dr Oskar Bera, docent, Tehnološki fakultet, Novi Sad, Univerzitet u Novom Sadu, predsednik komisije,  prof. dr Ljubinko Lević, redovni profesor, Tehnološki fakultet, Novi Sad, Univerzitet u Novom Sadu, mentor,  dr Ivan Pavkov, docent, Poljoprivredni fakultet, Novi Sad, Univerzitet u Novom Sadu, član,  dr Milada Pezo, naučni saradnik, Institut za nuklearne nauke, "Vinča", Beograd, član.
--	--

**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	Aca P. Jovanović ,Mech. Eng.
Mentor: MN	Prof. dr Ljubinko Lević, PhD, Full professor
Title: TI	The simulation of the particles movement during transport in the static mixer and modified screw conveyor using discrete element method
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	2015

Publisher: PU	Author's reprint
Publication place: PP	Bulevar cara Lazara 1, Novi Sad

Physical description: PD	6 chapters, 135 pages, 18 tables, 68 pictures, 170 references
Scientific field SF	Food Engineering Design and engineering
Scientific discipline SD	Feed technology
Subject, Key words SKW	Static mixer, Screw conveyors, DEM analysis, the trajectory of the particles, optimization, mixing time
UC	
Holding data: HD	Library of the Faculty of Technology
Note: N	

Abstract: AB	<p>The quality mixing of powders, particles and/or granules obtain an engineering, energetic, economic and ecological importance of various technologies, food industry, pharmaceutical and chemical industry. The mixing efficiency, the design of equipment and mixing parameters exert a strong impact on quality and the price of intermediate or final product. In this thesis, the use of Discrete Element Method (DEM) is shown for modeling of granular and/or powder flow in various multiple Komax and Ross mixing applications, as well as for the modified screw conveyors premixers . Computational Fluid Dynamic (CFD) method was used for modeling of fluid flow through Eulerian multiphase model, for the prediction of particle displacement within the various static mixers configurations. Fifteen horizontal screw conveyors with invariant pitch, with modified geometry and different screw length , with some additional elements welded on the helix were tested for the possibility of granular material mixing during the material transport (granulated zeolite).</p> <p>The results of the numerical simulation are compared with appropriate experimental results, according to relative standard deviation criterion (RSD). Application of this model provide the optimization of the geometry and parameters of mixing systems taking into account the quality of the mixing process and the cost of the final product.</p>
-----------------	--

Accepted on Scientific Board on: AS	14.11.2014
Defended: DE	
Thesis Defend Board: DB	<p>dr Oskar Bera, professor asistent, Technological faculty, Novi Sad, University of Novi Sad, president,</p> <p>prof. dr Ljubinko Lević, full professor, Technological faculty, Novi Sad, University of Novi Sad, menthor,</p> <p>dr Ivan Pavkov, professor asistent, Faculty of Agriculture, Novi Sad, University of Novi Sad, member,</p> <p>dr Milada Pezo, researcher associate, Institut of Nuclear Sciences, "Vinča", Beograd, member.</p>

---

<b>1. UVOD</b>	<b>1</b>
<b>2. PREGLED LITERATURE</b>	<b>4</b>
2. 1. Mešanje	4
2.2 Mehanizmi mešanja	6
2.3 Faktori koji utiču na mešanje	11
2.3.1 Veličina čestica	11
2.3.2 Protočnost materijala	12
2.3.3. Klasifikacija mešavina	14
2.3.4. Karakteristike smeša	14
2.3.4.1. Uniformnost i homogenost	14
2.3.5. Kriterijumi za utvrđivanje smeše	17
2.3.5.1 Uzimanje uzorka	17
2.3.5.2 Kriterijumi kvaliteta mešavine	17
2.4. Vrste mešalica i konstrukcija	19
2.4.1 Mešalice koje koriste silu agitacije	23
2.5 Statičke mešalice	25
2.6 Pužni transporter, pužne mešalice	29
2.7 Primena DEM analize kao simulacije procesa mešanja	33
2.7.1. Lagrange-ov i Euler-ov pristup modelovanju procesa mešanja	33
2.7.2. Istorijat i primena DEM analize	34
2.7.3. Materijal čestica i njihove interakcije važne za DEM modelovanje	36
2.7.3.1. Oblik i veličina čestice	36
2.7.3.2. Gustina čestica	36
2.7.3.3. Poasonov koeficijent i moduo smicanja čestica	37
2.7.3.4. Koeficijent restitucije čestica	37
2.7.3.5. Statički koeficijent trenja	38
2.7.3.6. Koeficijent trenja kotrljanja čestica	38
2.7.3.7. Nasipna gustina	39
2.7.3.8. Ugao mirovanja mase čestica	39
2.7.4. DEM numerički model	40



<b>3.MATERIJAL I METODE</b>	<b>47</b>
3.1. Materijal	47
3.1.1. Granulisani zeolit	47
3.1.2. Kukuruzna prekrupa	47
3.2 Metoda za određivanje homogenosti sa Microtracer-ima	48
3.3 Metoda za određivanje homogenosti obradom fotografije uzorka	50
3.4. Statičke mešalice	51
3.4.1 Statičke mešalice tipa Ross	51
3.4.2. Statičke mešalice tipa Komax	53
3.4.3. Statička rotaciona mešalica tipa Komax	55
3.5. Cilindrična mešalica	56
3.6. Pužni transporter, modifikacije i geometrijske karakteristike	57
3.7. DEM i CFD simulacija procesa mešanja u statičkim mešalicama	60
3.7.1. DEM/CFD model za statičke mešalice	60
3.7.1.1. Parametri DEM/CFD numeričke simulacija za statičke mešalice	66
3.7.2. DEM/CFD model za obrtnu statičku mešalicu tipa Komax	68
3.7.2.1. Parametri DEM/CFD numeričke simulacije za obrtnu statičku mešalicu tipa Komax	69
3.7.3. DEM model za modifikovane pužne transportere	69
3.7.3.1. Parametri DEM modela za modifikovane pužne transportere	76
<b>4. REZULTATI I DISKUSIJA</b>	<b>78</b>
4.1. Ispitivanja materijala (zeolit i samleveni kukuruz) upotrebljenih za testove mešanja	78
4.1.1. Sadržaj vode	78
4.1.2 Granulacija i protočne karakteristike	78
4.2. Homogenost mešavine u statičkim mešalicama	80
4.2.1. Homogenost mešavine kuglica zeolita primenom DEM/CFD simulacija nakon mešanja u statičkim mešalicama tipa Ross i Komax	80

---

4.2.2. Eksperimentalno određivanje homogenosti mešavine kuglica zeolita nakon mešanja u statičkoj mešalici tipa Ross i Komax	87
4.2.3. DEM simulacije mešanja granula zeolita u statičkoj mešalici tipa obrtni Komax	92
4.2.4. Eksperimentalni rezultati ispitivanja homogenosti samlevene kukuruzne prekrupе u statičkoj mešalici tipa Komax	95
4.2.4.1. Rezultati za odnos mešanja 1:10.000	95
4.3. DEM analiza kretanja kuglica zeolita u modifikovanim pužnim transporterima	105
4.3.1. Eksperimentalni rezultati ispitivanja homogenosti mešavine kuglica zeolita, za modifikovane pužne transportere	117
4.3.2. Poređenje eksperimentalnih rezultata i rezultata DEM simulacije pri transportu i mešanju u modifikovanim pužnim transporterima	118
<b>5. ZAKLJUČAK</b>	<b>120</b>
<b>6. LITERATURA</b>	<b>124</b>

**Sadržaj slika***Poglavlje 2*

Slika 2.1. Formiranje aglomerata u mešavini	6
Slika 2.2. Mehanizmi mešanja	7
Slika 2.3. Efikasnost mehanizma mešanja	9
Slika 2.4: Prikaz nekih mehanizama segregacije materijala	10
Slika 2.5. Primeri sposobnosti mešanja prema raspodeli veličine čestica	13
Slika 2.6: Prikaz promene homogenosti u dvokomponentnoj mešavini (a- potpuno odvojeni, b - prelazno stanje, c - stohastička mešavina, d - idealna mešavina)	18
Slika 2.7. Klasifikacija mešalica prema stanju materijala koji se meša	21
Slika 2.8. Klasifikacija mešalica	22
Slika 2.9. Mešalice koje koriste silu mešanja. a) šaržna mešalica Gericke MXC-150, b) kontinualna dobošasta mešalica, c) cevna vibraciona mešalica, d) pužna mešalica sa lopaticama, e) vibraciona mešalica DVS-N	24
Slika 2.10. Mešalice koje koriste silu gravitacije za mešanje. a) kontinualna gravitaciona mešalica sa kosim površinama, b) kontinualna gravitaciona konusna mešalica, c) obrtna statička mešalica, d) različita statičke mešalice iz firme Sulzer, e) elementi za mešanje u statičkim mešalicama	26
Slika 2.11. Primer industrijske primene statičke mešalice, (1) silos, (2) pužni transporter, (3) doziranje, (4) statička mešalica, (5) mešalica	27
Slika 2.12. Primer primene modifikovanog pužnog transportera u industriji, (1) silos, 2) pužni transporter-predmešalica, (3) levak, (4) glavna mešalica	32
Slika. 2.13 Numerički algoritam za DEM analizu	42
Slika 2.14 Kontakt između čestica $i$ i $j$	43
Slika 2.15 Kelvin-Voigt kontaktni model	45
Slika 2.16 Modifikovani Hertz-Mindlin kontaktni model	45

*Poglavlje 3*

Slika 3.1. Prikaz metode Microtracer® sa brojanjem tačkica	49
Slika 3.2. Prikaz metode Microtracer® sa spektrofotometrijskim određivanjem koncentracije	50

Slika 3.3. a) Fotografija statičke mešalice sa tri segmenta Ross, koja je korišćena u eksperimentu, b) Statička mešalica tipa Ross sa tri statička elementa (3d računarski model), c) element tipa Ross korišćen u modelu, d) Segment statičke mešalice tipa Ross u sklopu - poprečni presek	52
Slika 3.4. a) Fotografija statičke mešalice tipa Komax, sa tri segmenta koja je korišćena u eksperimentu, b) Statička mešalica tipa Komax sa tri statička elementa (3d računarski model), c) desnovojni element tipa Komax (3d računarski model), d) levovojni element tipa Komax (3d računarski model), e, f) Elementi statičke mešalice tipa Komax u sklopu cevi-presek (3d računarski modeli)	54
Slika 3.5. Obrtanje statičkog miksera	55
Slika 3.6. Cilindrična mešalica, model SYTH0.25	57
Slika 3.7. Pužni transporter napravljen za potrebe eksperimenta dužine 400 mm	58
Slika 3.8. Šematski prikaz modifikovanih pužnih transportera korišćenih u ovoj tezi	59
Slika 3.9. a) Eksperimentalna mešalica (tri-segmenta Ross), b) Šema mešalice tipa Ross - CFD model, b) granica modela	64
Slika 3.10 a) Šema mešalice tipa Komax-DEM, b) model Eksperimentalna mešalica (tri-segmenta Komax), c) Šema mešalice tipa Komax-CFD model	65
Slika 3.11. Numerička mreža koja se koristi za simulaciju a) Ross, b) Komax, bez i sa pregradama za smirivanje toka materijala u donjoj zoni	67
Slika 3.12. a) DEM model obrtni Komax, b) zakon obrtanja	69
Slika 3.13 Modifikovani pužni transporter, a) puž sa konstantnim korakom zavojnice, b) modifikovani pužni transporter sa tri dodatne zavojnice orijentisane u istom smeru kao i spirala puža, c) modifikovani pužni transporter sa tri dodatne zavojnice orijentisane u suprotnom smeru od spirale puža, d) modifikovani pužni transporter sa tri skraćene zavojnice orijentisane u suprotnom smeru od spirale puža, e) modifikovani pužni transporter sa tri dodatne pravolinijske lopatice	70
Slika 3.14 Mreže modela za. a) Puž sa konstantnim korakom zavojnice, b) Modifikovanog pužni transporter sa tri dodatne zavojnice orijentisane u istom smeru kao i spirala puža, c) Modifikovani pužni transporter sa tri dodatne zavojnice orijentisane u suprotnom smeru odspirale puža, d) Modifikovani pužni transporter sa tri skraćene zavojnice orijentisane u suprotnom smeru od spirale puža, e) Modifikovani pužni transporter sa tri dodatne pravolinijske lopatice	72

Slika 3.15. Šematski dijagram za numeričku simulaciju zavojnice	75
Slika 3.16. Šema modificiranog pužnog transportera sa tri dodatne zavojnice orijentisane u istom smeru kao i spirala	75
<i>Poglavlje 4</i>	
Slika 4.1. Nasipni ugao za zeolit	78
Slika 4.2. a) Polje brzina za fluidnu fazu u ravni (xy) (m/s) u karakterističnim presecima a) Ross, b) Ross sa segmentom za smirivanje toka materijala, c) Komax, d) Komax sa segmentom za smirivanje toka materijala	81
Slika 4.3. Polje brzina za fluidnu fazu za uzdužni presek u ravni (zy) (m/s) a) Ross, b) Komax	82
Slika 4.4. Polje pritisaka za fluidnu fazu (Pa), a) Ross, b) Komax	83
Slika 4.5. Trajektorije čestica za fluidnu fazu a) Ross, b) Komax	84
Slika 4.6. Rezultati numeričke simulacije (trajektorije čestica)	85
Slika 4.7: Poenkareove mape trajektorija čestica u različitim Poenkareovim presecima, a) 3-segmenta Ross konfiguracija i b) 3-segmenta Komax konfiguracija.	86
Slika 4.8. Eksperimentalni rezultati, slike preseka nakon prolaska materijala kroz mešalicu tipa Ross sa a) jednim elementom, b) sa dva elementa i c) sa tri elementa	87
Slika 4.9. Fotografija statička mešalica tipa Komax koji je korišćen u eksperimentu	88
Slika 4.10. a) Eksperimentalni rezultati nakon prolaska kroz statičku mešalicu, jedanput, b) dva puta i c) nakon tri prolaza	89
Slika 4.11. Rezultat mešanja u tro-segmentnoj Ross konfiguraciji a) eksperimentalno, b) obrađena fotografija	90
Slika 4.12. RSD kriterijum za mešanje Ross i Komax mešalice	91
Slika 4.13. a) Model DEM Obrtni Komax sa tri segmenta, b) Projekcije trajektorije jedne izdvojene čestice tokom procesa mešanja, c) Položaj crvenih i plavih čestica nakon jednog, dva i tri rotacije mešalice.	93
Slika 4.14. Zavisnost RSD kriterijuma od broja prolaza kroz rotacionu statičku mešalicu	94
Slika 4.15. Zavisnost vrednosti koeficijenta varijacije od broja propuštanja kroz statičku mešalicu	98

Slika 4.16. Koeficijent varijacije u zavisnosti od vremena mešanja u cilindričnoj mešalici	101
Slika 4.17. Zavisnost koeficijenta varijacije od vremena mešanja	105
Slika 4.18. Puž sa konstantnim korakom zavojnice, promene Kartenzijevih koordinata tačke tokom vremena	108
Slika 4.19. Modifikovanog pužni transporter sa tri dodatne zavojnice orijentisane u istom smeru kao i spirala puža, promene Kartenzijevih koordinata tačke tokom vremena	108
Slika 4.20. Modifikovani pužni transporter sa tri dodatne zavojnice orijentisane u suprotnom smeru od spirale puža, promene Kartenzijevih koordinata tačke tokom vremena	108
Slika 4.21. Modifikovani pužni transporter sa tri skraćene zavojnice orijentisane u suprotnom smeru od spirale puža, promene Kartenzijevih koordinata tačke tokom vremena	109
Slika 4.22. Modifikovani pužni transporter sa tri dodatne pravolinijske lopatice, promene Kartenzijevih koordinata tačke tokom vremena	109
Slika 4.23. Trajektorija uočene čestice od trenutka ulaska do trenutka napuštanja puža	109
Slika 4.24. Trajektorija više uočene čestice od trenutka ulaska do trenutka napuštanja puža	110
Slika 4.25. Brzina čestice (m/s) tokom kretanja kroz puž-projeksija a) u pravcu ose x, b) u pravcu ose y, c) u pravcu ose z d) zbirna	111
Slika 4.26. Ubrzanje čestice (m/s <sup>2</sup> ) tokom kretanja kroz puž-projeksija a) u pravcu ose x, b) u pravcu ose y, c) u pravcu ose z d) zbirna	112
Slika 4.27. Ugaona brzina čestice (deg/s) tokom kretanja kroz puž-projeksija a) u pravcu ose x, b) u pravcu ose y, c) u pravcu ose z d) zbirna	113
Slika 4.28. Ugaono ubrzanje čestice (deg/s <sup>2</sup> ) tokom kretanja kroz puž-projeksija a) u pravcu ose x, b) u pravcu ose y, c) u pravcu ose z d) zbirna	114

---

Slika 4.29. Trajektorije čestica. a) puž sa konstantnim korakom zavojnice, b) modifikovani pužni transporter sa tri dodatne zavojnice orijentisane u istom smeru kao i spirala puža, c) modifikovani pužni transporter sa tri dodatne zavojnice orijentisane u suprotnom smeru od spirale puža, d) modifikovani pužni transporter sa tri skraćene zavojnice orijentisane u suprotnom smeru od spirale puža i e) modifikovani pužni transporter sa tri dodatne pravolinijske lopatice	115
Slika 4.30. (a) Eksperimentalni pužni transporter (b) Rezultati mešanja, primenom modifikovanog pužnog transportera sa tri dodatne pravolinijske lopatice	118
Slika 4.31. RSD kriterijum mešanja za modifikovane pužne transportere - oznake su kao na slici 4.29	119

**Sadržaj tabela***Poglavlje 2*

Tabela 2.1. Fizičke i hemijske osobine komponenata	13
Tabela 2.2. Mehanizmi mešanja u različitim tipovima mešalica	19

*Poglavlje3*

Tabela 3.1. Uslovi simulacije i parametri za modelovanje procesa	68
Tabela 3.2. Uslovi simulacije i parametri za modelovanje	76
Tabela 3.3. Geometrija pužnog transportera	77

*Poglavlje4*

Tabela 4.1. Rezultati ispitivanja granulometrijskog sastava samlevenog kukuruza	79
Tabela 4.2.1. Homogenost mešavine samlevene kukuruzne prekrupе pri prolasku kroz statičku mešalicu tipa Komax za odnos mešanja 1:10.000, granulacije 3 mm, nakon jednog propuštanja	95
Tabela 4.2.2. Homogenost mešavine samlevene kukuruzne prekrupе pri prolasku kroz statičku mešalicu tipa Komax za odnos mešanja 1:10.000, granulacije 3 mm, nakon tri propuštanja	96
Tabela 4.2.3. Homogenost mešavine samlevene kukuruzne prekrupе pri prolasku kroz statičku mešalicu tipa Komax za odnos mešanja 1:10.000, granulacije 3 mm, nakon pet propuštanja	97
Tabela 4.2.4. Zavisnost RSD vrednosti od broja prolaza kroz statičku mešalicu tipa Komax	97
Tabela 4.3.1. Homogenost mešavine samlevene kukuruzne prekrupе pri mešanju u cilindričnoj mešalici za odnos mešanja 1:10.000, za 30 sekundi	99
Tabela 4.3.2. Homogenost mešavine samlevene kukuruzne prekrupе pri mešanju u cilindričnoj mešalici za odnos mešanja 1:10.000, za 90 sekundi	100
Tabela 4.3.3. Homogenost mešavine samlevene kukuruzne prekrupе pri mešanju u cilindričnoj mešalici za odnos mešanja 1:10.000, za 150 sekundi	100
Tabela 4.3.4. Zavisnost RSD u rotacionoj cilindričnoj mešalici od vremena mešanja	101



Tabela 4.4.1 Homogenost mešavine samlevene kukuruzne prekrupe pri mešanju u cilindričnoj mešalici za odnos mešanja 1:10.000, za 15 sekundi, sa materijalom koji je predhodno propušten kroz Komax statičku mešalicu.	102
Tabela 4.4.2. Homogenost mešavine samlevene kukuruzne prekrupe pri mešanju u cilindričnoj mešalici za odnos mešanja 1:10.000, za 45 sekundi sa materijalom koji je predhodno propušten kroz Komax statičku mešalicu.	103
Tabela 4.4.3. Homogenost mešavine samlevene kukuruzne prekrupe pri mešanju u cilindričnoj mešalici za odnos mešanja 1:10.000, za 75 sekundi sa materijalom koji je predhodno propušten kroz Komax statičku mešalicu.	104
Tabela 4.4.4. Zavisnost koeficijenta varijacije od vremena mešanja u cilindričnoj mešalici nakon predmešanja u Komax statičkoj mešalici	104
Tabela 4.5. Vrednosti kordinata položaja centralne tačke uočene čestice za prirašaj vremena od 1s od trenutka ulaska do trenutka izlaska iz puža	107

## 1. UVOD

Gravitacioni transport materijala je vrsta transporta kod koga se ne koristi dodatna energija, već se transport materijala vrši samo delovanjem sile zemljine teže. Transport materijala se vrši na osnovu razlike pritiska ili kinetičke i potencijalne energije samog materijala.

Proces mešanja praškastih, granulastih i zrnastih materijala je sa inženjerskog, energetskog, ekonomskog i ekološkog stanovišta izuzetno značajan u procesnoj, hemijskoj, farmaceutskoj industriji, prehrambenoj industriji itd. Mešanjem se može dobiti konačan finalni proizvod ili poluproizvod, koji se kasnije treba još dodatno tretirati. Na sam kvalitet i cenu gotovog proizvoda ili poluproizvoda značajan uticaj ima proces mešanja. Takođe na efikasnost mešanja utiču i: konstrukcija opreme, način doziranja materijala, odmeravanje materijala, transport i sl.

Pod terminom "mešanja" podrazumevaju se sve operacije pri kojima se smanjuje neuniformnost sastava, svojstva ili temperature rasutog materijala. Većina opreme koja se koristi u industriji zadovoljava osnovne tehničke kriterijume, ali se obično ne pridaje dovoljna pažnja konstrukciji i dizajnu opreme, kojom bi se značajno doprinelo optimizaciji samog procesa mešanja. Na ovaj način se dobija proizvod čiji kvalitet nije zadovoljavajuće izmešan ili se dobija zadovoljavajuća homogenost, ali uz prevelik utrošak energije, što značajno poskupljuje finalni proizvod. Potrebno je odrediti i optimalno vreme mešanja, jer previše dugo mešanje može dovesti do deformacije ili segregacije komponenti, koje nisu ujednačenih fizičkih karakteristika. Optimizacija procesa mešanja vrši se sa više stanovišta: vremena mešanja, konstrukcije i dizajna opreme, kvaliteta mešavine i utroška energije potrebne za proces mešanja. Takođe je potrebno izvršiti optimizaciju već instalirane opreme koja se koristi u procesu, kako bi se ona učinila efikasnijom i produktivnijom.

U ovoj disertaciji je analiziran transport materija u statičkim mešalicama i modifikovanim pužnim transporterima.

Statičke mešalice su vrsta uređaja koji za proces mešanja ne koriste dodatnu energiju, već se na proces mešanja utiče delovanjem gravitacione sile. Ove mešalice homogenizuju materijal koristeći razliku pritiska ili kinetičku i potencijalnu energiju tretiranih materijala. Upravo zbog toga je od izuzetnog značaja pravilan izbor geometrija mešalice, optimalan broj elemenata mešanja i projektovanje brzina kretanja radnog fluida ili zrnastog materijala. Potrebno je odrediti optimalnu putanju materijala kako bi se dobio zadovoljavajući kvalitet mešanja uz minimalne troškove mešanja. Unutar cevi statičkog mešača nalazi se profilisani

element koji usmerava kretanje materijala, čime se stvaraju razlike u brzini pojedinačnih čestica, a pri tome dolazi do premeštanja različitih delova materijala koji se kreću kroz profilisane mešače. Statički mešači se najčešće postavljaju u dugačke vertikalne cevi ili cilindrične omotače i svojom profilisanom geometrijom (od koje zavisi i efekat mešanja) utiču na promenu smera proticanja materijala. Mogu se primenjivati u širokom opsegu operacija u industriji, uključujući doziranje, mešanje, disperziju, laminarni protok, razmenu toplote i formiranje emulzija. Proces mešanja se odvija zahvaljujući stalnom deljenju, širenju i transportu komponenti materijala koji se mešaju. Ovi mešači se nalaze u jednoprolaznim sistemima, ili u procesu sa recirkulacionom petljom, pri čemu imaju ulogu dodatnih mešalica ili predmešalice, a javljaju se i kao potpuna zamena konvencionalnih mešalica. Ovi mešači se koriste i u laminarnom i u turbulentnom režimu rada, pri čemu u materijalu, dolazi do deljenja, premeštanja, razdvajanja, ubrzavanja, usporavanja i rekombinacija različitih delova materijala, bilo da se radi o fluidu ili o čvrstom materijalu.

Pužni transporteri se veoma intenzivno koriste u industriji za proizvodnju i preradu hrane, plastike, mineralnih sirovina, u poljoprivrednoj proizvodnji kao i u prerađivačkoj industriji za podizanje i/ili transport rasutih materijala na kratkim i srednjim rastojanjima. Uprkos njihovoj očiglednoj konstruktivnoj jednostavnosti, sam čin transporta je veoma složen za razumevanje, pa se konstruktori često oslanjaju na iskustvene podatke pri konstruisanju i izradi ovih transportera. Osobine pužnih transportera su određene radnim uslovima (kao što su: brzina rotacije vratila puža, ugao pod kojim je nagnut pužni transporter, nivo zapreminskog punjenja puža, itd.).

Za modelovanje strujnih i termičkih procesa najefikasnija je metoda numeričke dinamike fluida (engl. Computational Fluid Dynamics - CFD). Postoje dva principa za modelovanje strujanja čestica ili mešanja praškastih materijala: Lagrange-ov model ili Euler-ov model.

Matematičko modelovanje primenom metode diskretnih elemenata (DEM) se pokazalo kao najefikasnije za modelovanje procesa mešanja u energetici, prehrambenoj, hemijskoj, farmaceutskoj industriji. Ukoliko neki fluid značajno utiče na proces mešanja rasutog materijala, pokazalo se da je CFD pristup izuzetno koristan, pouzdan i efikasan za dobijanje potrebnih informacija o dinamici fluida tokom mešanja. Tada se koristi spregnuti DEM/CFD pristup i na taj način se analizira ponašanje materijala koji se mešaju, kao i ponašanje fluida koji potpomaže to mešanje.

Cilj ove disertacije je:

- Da se na osnovu fizičkih karakteristika rasutog materijala koji se meša: zeolit ili kukuruz dobijen mlevenjem na mlinu čekićaru određenog otvora sita odredi optimalna homogenost mešavine u zadatoj geometriji mešalice
- Eksperimentalno ispitivanje homogenosti materijala u statičkim mešalicama tipa Ross i Komax;
- Eksperimentalno određivanje homogenosti materijala u rotacionoj statičkoj mešalici tipa Komax;
- Eksperimentalno određivanje homogenosti materijala u modifikovanim pužnim transporterima;
- Analiziranje procesa mešanja u statičkim mešalicama tipa Ross i Komax primenom DEM i DEM/CFD metode;
- Analiziranje procesa mešanja u u modifikovanim pužnim transporterima primenom DEM metode;
- Optimizovanje geometrije i procesnih parametara u u statičkim mešalicama tipa Ross i Komax primenom DEM/CFD metode.
- Optimizovanje geometrije i procesnih parametara u modifikovanom pužnom transporteru primenom DEM metode.

Na osnovu ove analize je moguće pouzdano predvideti ponašanje sličnih sistema u različitim primenama u industriji, za različite geometrije i za različite vrste materijala. Ovakav pristup značajno doprinosi poboljšanju kvaliteta mešanja, smanjenju utroška energije, smanjenju vremena mešanja, poboljšanju kvaliteta finalnog proizvoda i značajnoj uštedi u procesu proizvodnje.

Kvalitet mešanja se ispituje primenom metode relativne standardne devijacije (eng. relative standard deviation - RSD kriterijuma), koji se veoma često koristi u hemijskoj, farmaceutskoj i prehrambenoj industriji.

## 2. PREGLED LITERATURE

### 2. 1. Mešanje

Proces mešanja je od izuzetnog značaja u prehrambenoj, hemijskoj, farmaceutskoj i procesnoj industriji. Kao primarni cilj procesa mešanja nameće se dobijanje što kvalitetnijeg proizvoda (što bolja umešanost), uz što kraće vreme i što manji utrošak energije.

Mnogi faktori utiču na kvalitet mešanja. Fizičke karakteristike materijala, kao što su gustina čestica, oblik, prečnik čestica i međusobni odnos veličina, površinska svojstva i intenzitet sile kohezije su veoma važne, pre svega kako bi se utvrdila tendencije ponašanja čestica u procesu mešanja (umešavanje ili razmešavanje - segregacija). Aspekti koji su vezani za opremu, uslove rada i formulacije, kao što su tip, konstrukcija i dizajn mešalice i način rada, kombinacija uslova rada, kao i različite recepture takođe su važni i zahtevaju posebnu pažnju (*Bellamy i sar.*, 2004; *Bertiaux i sar.*, 2006; *Chaudhuri i sar.*, 2006).

Na proces mešanja utiču i nivo punjenja, brzina i vreme mešanja. Mnogi naučni radovi proučavaju zavisnost između homogenosti i vremena mešanja. Postoje dva osnovna metoda za praćenje homogenosti mešanja: kontinualno praćenje homogenosti mešanja, kod koga se uzorak uzima periodično iz mešalice (*Tallon i Davies*, 2008) i praćenje homogenosti materijala nakon procesa mešanja. Za određivanje kvaliteta mešavine se uzima 10-30 uzoraka uz pomoć sonde iz serije od bezbroj mogućih uzoraka (*Ireas i sar.*, 2010). Kao primer *Muzzio i sar.* (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.

U naučnim radovima brojnih autora, proučavane su različite vrste mešalice (*Wightman i sar.*, 1998; *Kuo i sar.*, 2002; *Zhang i Sernas*, 2002; *Sudah i Muzzio*, 2002; *Arratia i sar.*, 2006), njihove konfiguracije, uslovi rada i svojstva materijala. Svrha ovih istraživanja je da se prouči ponašanje rasutog materijala u mešalicama. Ove studije obezbeđuju uvid u protok materijala tokom mešanja (*Paul i sar.*, 2004).

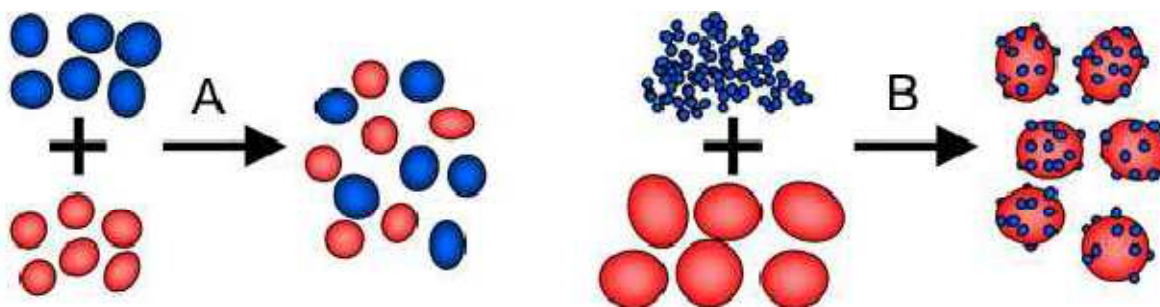
Ispitivanje efikasnosti mešanja se postiže korišćenjem senzora unutar mešalice, kao što su specijalne kamere (*Wightman i sar.*, 1998; 2001; *Realpe i Velazquez*, 2003), analizom slike sa dodatim obeleživačima ili NIRS (Near Infrared Spectroscopy) (*Bellamy i sar.*, 2004) kako bi se utvrdile tačke u kojima je postignut maksimum homogenosti i sl. Većina metoda kojima se utvrđuje stanje izmešanosti, zasnovane su na Lejsijevom indeksu (*Lacey*, 1943,

1954). Ovaj metod se zasniva na uzorkovanju, kao i izračunavanju u kom procentu je svaka komponenta prisutna u uzorku. Još jedan način da se definiše proces mešanja, predstavio je *Cleary i sar.*, 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 i sar.* (2000) koriste metod gde posmatrana osobina predstavlja lokaciju čestice. Najčešće korišćen matematički kriterijum za određivanje kvaliteta mešanja je kriterijum relativne standardne devijacije (RSD kriterijum), koji je detaljno opisan u (*Lemieux i dr.*, 2008). U praksi se za određivanje kvaliteta mešanja upotrebljavaju obeleživači tipa »*Microtracer*« na bazi obojenih čestica gvožđa sa tačno definisanom veličinom i brojem čestica po gramu, *Duragić*, 2011.

Primenom metode diskretnih elemenata (DEM) moguće je pouzdano predvideti ponašanje materijala prilikom mešanja. Detaljan pregled rezultata koji se odnose na primenu DEM analize je dat u (*Bridgwater*, 2012). Danas se DEM modeli koriste za proučavanje kretanja reda veličine 10.000-250.000 čestica, sa stalnim povećanjem broja čestica koje se analiziraju. Strategija koja objedinjuje efekte veličine čestica, gabarita i geometrije opreme je nešto na čemu će se i u budućnosti raditi, sa ciljem da se primene naučni principi u industrijskoj proizvodnji. *Zhu i dr.* (*Zhu*, 2007, 2008) su dali pregled rezultata iz oblasti simulacije metodom diskretnih elemenata u poslednje dve decenije. Proučavanje je podeljeno u tri oblasti : slaganje čestica, protok čestica i protok čestica i fluida. Poseban akcenat je stavljen na mikro dinamiku rasutog materijala uključujući i slaganje čestica i protok i međusobne veze između pojedinačnih čestica, čestica i fluida i čestica i zida.

Da bi ceo postupak mešanja neke smeše bio efikasan, uključujući i umešavanje, 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 mešavine (*Figueroa i sar.*, 2009). U suprotnosti sa mešanjem gasova ili tečnosti gde se mešanje odvija na makro i mikro nivou (na nivou molekula), mešavina 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).

Veoma fine čestice sa snažnim površinskim silama (prečnik čestice ispod 100 $\mu$ m) i veoma snažnim površinskim silama (prečnik čestice ispod 10  $\mu$ m) imaju sposobnost da formiraju aglomerate (slika 2.1). Za njihovo razbijanje je neophodna veća snaga i energija mešanja, ali i pored toga mogu dati dobre kohezione mešavine (*Hongming*, 2002)



Slika 2.1. Formiranje aglomerata u mešavini, *Hongming 2002; Đuragić, 2011*

## 2.2. Mehanizmi mešanja

Kod praškastih materijala, čestice menjaju svoju poziciju samo u slučajevima kada je njihovo kretanje izazvano spoljnim uticajem. Kada se čestice pokrenu pod dejstvom neke sile, one se kreću bilo da teže da se izmešaju ili segregiraju, što zavisi od osobina čestica ili sile koja je izazvala to kretanje. Nasuprot tečnim smešama, mešanje praškastih materijala 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 mešavina praškastih materijala može biti u potpunosti razmešana prolaskom kroz proizvodni proces ili neadekvatnim rukovanjem (*Nienow, 1992*).

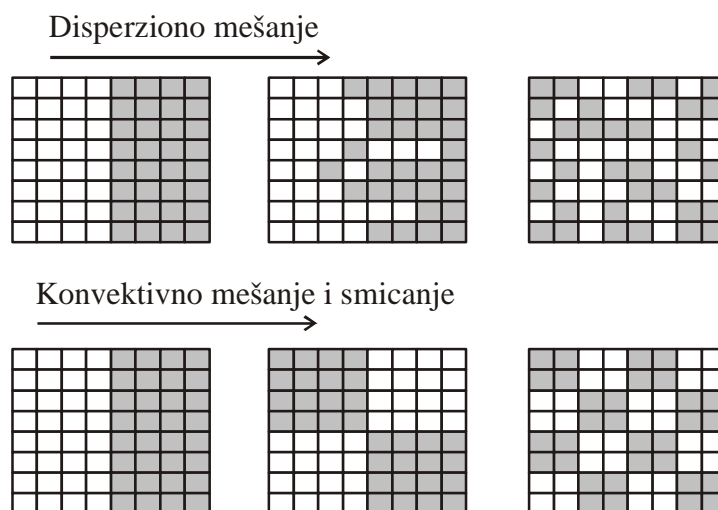
Rukovanje i operacije sa praškim materijalima i njihovo mešanje i pojava segregacije su blisko povezani. Ukoliko materijal ima snažnu tendenciju segregacije, utoliko će transport i kontrola biti teži. Ispitivanje mehanizma po kome se odvija proces mešanja i segregacije i dobijeni rezultati, u mnogome 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 njihova mešavina, iziskuju različit pristup u mešanju i rukovanju. Materijali koji su dobro protočni su lakši za rukovanje i transport, lakše se mešaju, ali imaju izraženiju tendenciju ka segregaciji. Kohezivni praškasti materijali uzrokuju probleme u protoku i transportu ali su ovakve mešavine daleko stabilnije (*Nienow, 1997*).

Mehanizam mešanja je povezan sa načinom na koji su raspoređene različite čestice. *Lacey 1954*, je predložio tri različita mehanizma mešanja:

1. Konvektivno mešanje je premeštanje velikih grupa čestica sa jedne lokacije na drugu. Ovo je brz, ali nije efikasan način mešanja;
2. Difuziono mešanje se ostvaruje raspodelom čestica na novoj razvijenoj površini. Ovaj način nije brz, ali je efikasan;
3. Smičuće mešanje se ostvaruje stvaranjem smičućih ravni u mešavini.

Još jedan mehanizam koji se vezuje za čvrsta mešanja je haotično mešanje. Haotično mešanje značajno doprinosi mešanju čestica i praha (*Ottino i sar.*1988; *Ottino*, 1989, 1990; *Fan*, 2001). Obrasci mešanja su izuzetno složeni. Ipak, kaos je deterministički fenomen; rezultati i interakcije haotičnog mešanja u konvektivnom i smičućem mešanju su veoma slični. Pri mešanju čvrstih materijala, dolazi do odvajanja komponenti unutar mešavine, pa dolazi do nepravilnog mešanja. Do ovoga dolazi u slučaju kada komponente koje se mešaju imaju identične fizičke osobine i geometrijske karakteristike, ali se razlikuju samo u hemijskom sastavu.



Slika 2.2. Mehanizmi mešanja, *Ponomarev*, 2006; *Cullen*, 2009; *Marigo* 2012

Smičuće mešanje može se predstaviti kao poseban slučaj konvektivnog mešanja. Model difuzionog mešanje se može primeniti ne samo za slobodne površine materijala koji se meša, već i za mešanje u slojevima čestica. Takođe, potrebno je naglastiti da je proces mešanja mnogo složeniji proces od bilo kog od pomenutih mehanizama mešanja. U većini slučajeva u praksi se istovremeno javlja više različitih mehanizama mešanja, *Ponomarev*, 2006; *Marigo* 2012. Tako se konvektivni i smičući mehanizam ne mogu potpuno razdvojiti i njihova međusobna veza zavisi od uslova mešanja i osobina tretiranih materijala. U pneumatskim transporterima se javlja konvektivni mehanizam mešanja sa relativno malim



gradijentom brzine i blagim smicanjem. Ako imamo turbulentno strujanje, sa česticama u fluidizovanom sloju, gradijent brzine je značajno veći, ali se smicanje javlja samo između susednih čestica.

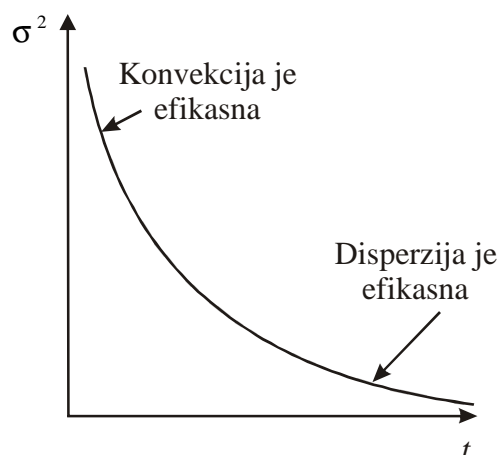
Ukoliko se javljaju gusti slojevi materijala pri mešanju, konvektivni mehanizam i mehanizam smicanja se javljaju zajedno, pogotovu ukoliko je razlika u brzinama značajna za različite zone, *Ponomarev, 2006; Marigo 2012*. Odvojene regije u kojima materijal ima veliku gustinu i različite brzine mešanja pojavljaju se u većini mešalica i u tim slučajevima se istovremeno postoje konvektivni i smičući mehanizam mešanja. Difuzno mešanje je analogno sa molekularnom difuzijom, koja se javlja kod fluida, usled stohastičkog kretanja čestica. Osnovna razlika između difuzionog mešanja i molekularne difuzije je što se molekularna difuzija odvija spontano, dok se čestice moraju pobuditi (pod uticajem neke spoljne sile) da bi se kretale. Na primer, konvektivno i difuziono mešanje se mogu javiti istovremeno u celoj zapremini prilikom mešanja u fluidizovanom sloju. U rotirajućim cilindričnim mešalicama, difuzioni tip mešanja se javlja u gornjoj slobodnoj površini, gde se čestice kotrljaju po nagibu u zavisnosti od nagibnog ugla. U slučaju mešanja slojeva čestica, primarna je konvekcija. Pojedine čestice mogu da menjaju svoje putanje izazivajući tako difuziono mešanje, zbog stohastičkog mešanja unutar sloja. Ovi mehanizmi, koji deluju istovremeno i spregnuto, izazivaju transversalno i relativno slabo aksijalno mešanje, *Bertiaux, i sar. 2004*.

Proces mešanja se takođe može posmatrati u zavisnosti od njegove systemske ili stohastičke prirode. U makroskopskom smislu, stohastičko mešanje je proces u kome se različite regije slojeva čestica raspoređuju stohastički. To odgovara haotičnom konvektivno-smičućem mehanizmu mešanja. U mikroskopskom smislu, stohastičko mešanje je identično difuzivnom mešanju, koje je izazvano haotičnim kretanjem pojedinih čestica, *Alhwwaige, 2007*.

Smičući i konvektivni mehanizam su karakteristični za određene tipove mešalica u kojima nema kretanja delova mešalice (npr. staičke mešalice) i gde se protok materijala uređuje tokom vremena i prostora po određenom šablonu, *Bertiaux, i sar. 2004*.

Da bi se dobilo efikasno mešanje (slika 2.3) potrebno je da istovremeno budu zastupljeni različiti mehanizmi mešanja. Samo konvektivnim ili samo smičućim mešanjem ne može se postići homogenost čestica u razumnom vremenskom periodu mešanja. U prvom stadijumu mešanja, konvektivni mehanizam mešanja je najefikasniji. Međutim, kasnije difuzivni (disperzioni) mehanizam mnogo značajnije doprinosi mešanju. Zato je potrebno da

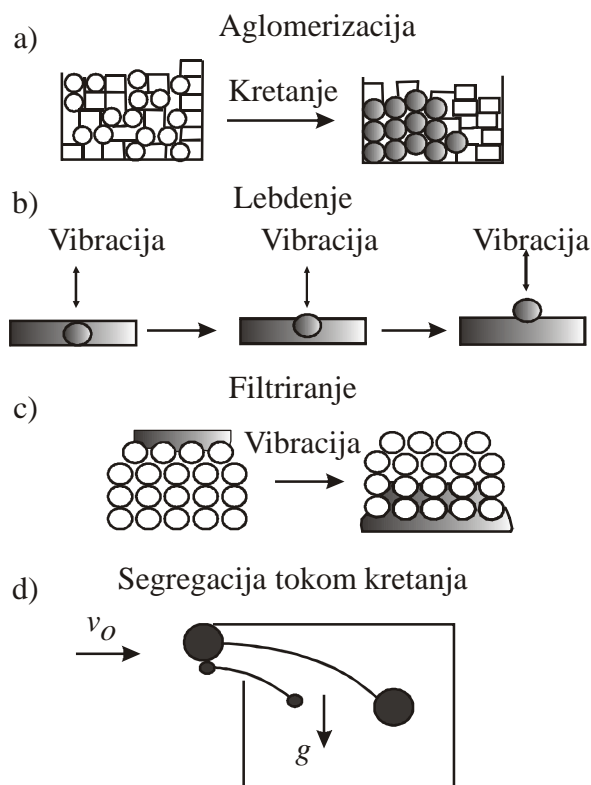
se difuziono mešanje javi zajedno sa konvektivnim i smičućim, kako bi se obezbedio visok kvalitet mešavine za što kraće vreme, *Bridgwater*, 2012.



Slika 2.3. Efikasnost mehanizma mešanja, *Bertiaux, i sar.* 2004; *Alhwwaige*, 2007

Mešanje čvrstih materijala je veoma često praćeno neželjenom segregacijom ili razdvajanjem čestica materijala. Segregacija se može definisati kao obrnut proces od homogenizacije. Gotovo uniformna prostorna raspodela komponenti može se potpuno preobraziti u razdvojene slojeve čestica usled segregacije, koje nisu izmešane, ali nisu ni fiksirane, ukoliko segregacija ima više uticaja nego mešanja. To znači da se može javiti i segregacija tokom mešanja materijala, kao suprotan proces procesu homogenizacije. Segregacija se može javiti iz različitih razloga. *Williams* (1976) i *Weinekotter* (2000) su opisali nekoliko različitih uzroka pojave segregacije:

1. Putanja segregacije je uzrokovana odstupanjem između trajektorija čestica koje se kreću kroz gasnu fazu, ili različitim putevima svake pojedine čestice, koje se kreću pod dejstvom spoljne sile ili klize niz kosu ravan koju formiraju slojevi čestica (slika 2.4 c).
2. Filtriranje segregacijom se dešava kada se fine čestice kreću kroz pore u materijalu koje formiraju grublje čestice. Filtriranje se podstiče trešenjem, vibracijama ili strujanjem kroz sloj čestica, tj. otvaranjem i stvaranjem novih pora u materijalu (slika 2.4 b).
3. Plutanje (levitacija) pojedinačnih čestica u sloju čestica (*Weinekotter*, 2000) dovodi do sličnih rezultata kao i filtriranje, ali u ovom slučaju grublje čestice plutaju ka gornjoj površini sloja čestica, usled toga što manje čestice prodiru u prazan prostor ispod grubljih čestica, a zatim ih potiskuju na gore (nasuprot sili zemljine teže).



Slika 2.4: Prikaz nekih mehanizama segregacije materijala, *Ponomarev*, 2006

Nove pore u praškastom materijalu se stvaraju usled trešenja, vibracija u materijalu ili neke druge vrste kretanja čestica, pa se filtriranje nastavlja. Filtriranje se javlja uglavnom u slojevima čestica u kojima je zapremina slojeva čestica relativno mala, dok se mehanizam plutanja javlja kada su grube čestice u manjini (slika 2.4 a). Plutanje ili tonjenje (*Weinekotter*, 2000) se javlja u fluidizovanom sloju ili u slučaju dvofaznog strujanja gas-čestice. Relativno tonjenje ili uspinjanje zavisi od veličine čestica, gustine, oblika, površinskih svojstva, relativnih brzina čvrste i gasne faze, udela praznina u sloju čestica i drugih faktora.

*Weinekotter i Gericke* (2000) su izdvojili četiri mehanizama segregacije. Nagomilavanje u binarnoj (dvokomponentnoj) mešavini nastaje kada postoje jake sile između čestica koje su u međusobno bliskom kontaktu. Čestice jedne komponente grupišu se međusobno kao posledica jednog ili više faktora, uključujući:

(I) prisustvu male količine tečnosti koje formiraju zapremine tečnosti u čvrstim česticama;

(II) elektrostatičke sile koja izaziva grupisanje čestica i

(III) Van der Valsove sile koje se javljaju kod finijih (kvalitetnija) zrna ( $<30\mu\text{m}$ ), preko kojih se one grupišu.

Međusobna adhezija čestica jedne komponente dovela bi do njenog nagomilavanja u pojedinim delovima mešavine, što za uzvrat može da prouzrokuje odvajanje čestica te komponente od čestica druge komponente.

### 2.3 Faktori koji utiču na mešanje

Kvalitet neke mešavine zavisi od osobina materijala koji se mešaju, konstrukcije i dizajna mešalice i prateće opreme, kao i uslova mešanja.

#### 2.3.1 Veličina čestice

Najveći uticaj na proces mešanja imaju osobine samih čestica, a to su: veličina čestica i njihov oblik, kao i hemijske i fizičke osobine čestica.

Čestice koje se razlikuju po veličini, teže da segregiraju i to tako da se finije čestice talože na dnu uređaja za mešanje. Fine čestice (veličine ispod 10 mikrona) su kohezivne usled smanjenja efekata gravitacione sile, a ova pojava vodi ka uređenom mešanju (*Hongming, 2002; Bellamy. i sar., 2004; Portillo i sar., 2009*).

Da bi se dobio zadovoljavajući kvalitet finalnog proizvoda potrebno je da se dobro izbalansiraju sve komponente koje čine smešu. Treba naročito obratiti pažnju na koncentraciju, fizičke i hemijske karakteristike svih sastojaka. Čestice sfernog oblika, uniformne veličine i gustine se dobro mešaju i formiraju homogenu smešu. Međutim, homogena smeša se može dobiti naknadnom obradom materijala (usitnjavanjem) do željene veličine čestica i poboljšanjem protočnosti (*Chaudhuri i sar., 2006; Geldart i sar., 2006*).

Veličina (prečnik) čestica je veoma važan faktor u definisanju protočnih karakteristika smeše i praksa ukazuje da je potrebno obratiti pažnju na sledeće (*Hongming, 2002*):

- (a) smeše sa veličinom čestica većom od 75  $\mu\text{m}$  imaju tendenciju segregacije,
- (b) redukcijom veličine čestica ispod 75  $\mu\text{m}$  znatno se smanjuje težnja materijala ka segregaciji, ali može da se registruje sve do veličine čestica od 10  $\mu\text{m}$
- (c) smeše sa veličinom čestica ispod 10  $\mu\text{m}$  ne podležu značajnijoj 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

Kohezija između čestica može se javiti usled delovanja različitih sila, kao što su: kapilarne sile, Van der Valsove sile i elektrostatički napon, *Hongmingu*, 2002. Međutim, postoje i drugi faktori koji utiču na protočnost praškastih/granulisanih materijala. Na primer, dodavanje male količine vode može značajno uticati na pojavu segregacije (*Kaye*, 1997). Takođe, ukoliko je velika razlika u veličini čestica koje se mešaju, može doći do toga da sitnije čestice okruže ili prekriju one krupnije i da se na taj način spreči njihovo kretanje, što takođe može dovesti do segregacije (*Baxter i sar.*, 2000). Međutim, u industrijskim uslovima se segregacija veoma često javlja i nije je moguće eliminisati, već samo smanjiti. To se postiže pravilnim odabirom sastojaka i odgovarajućim kvalitetom sastojaka mešavine.

Da bi se uticalo na kvalitet mešanja potrebno je odrediti parametre koji utiču na homogenizaciju mešavine, kao što su: nasipna masa, nasipni ugao, masa sabijanja, indeks sabijanja, vreme mešanja itd., *Baxter i sar.*, 2000.

Nasipna masa se definiše kao masa jedinice zapremine materijala. Nasipna masa materijala nelinearno opada sa smanjenjem veličine čestica. Ova pojava dovodi do smanjenja gustine praškastih/granulisanih materijala, mase, zapremine i specifične površine čestica i povećanja broja čestica unutar definisane zapremine. Na ovaj način se povećava poroznost smeše, tj sprečava se gušće pakovanje čestica i poboljšava njihova protočnost, *Baxter i sar.*, 2000.

Nasipni ugao se definiše kao ugao koji se formira između horizontalne površine i nagiba kupe materijala. Kupa materijala se formira slobodnim padom ili isticanjem materijala bez posebnih uslova (*Geldart i sar.*, 2006).

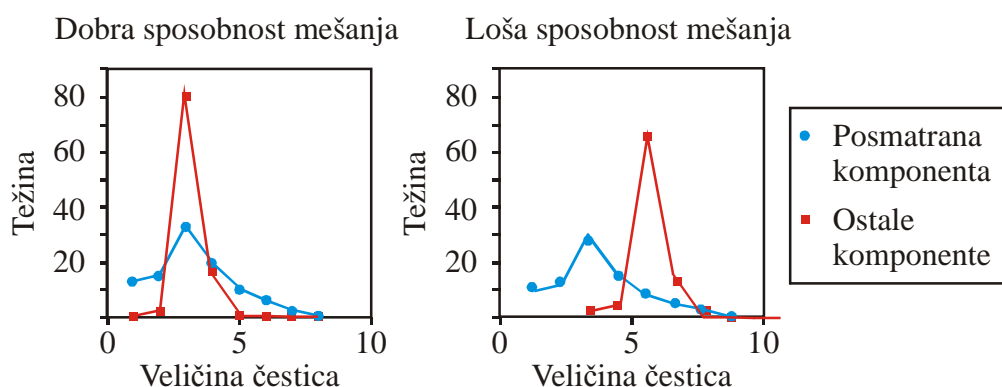
Masa sabijanja se definiše kao maksimalna gustina pakovanja praškastog materijala ili smeše materijala, koja se dobija kada se materijal podvrgne definisanoj spoljašnjoj sili. Ova veličina zavisi od prečnika i oblika čestica, gustine i vlažnosti materijala. Potrebno je odrediti i veličinu koja se zove indeks sabijanja. To je odnos zapremine materijala pre i posle sabijanja. Što je indeks sabijanja manji, to je protočnost veća i obrnuto, *Geldart i sar.*, 2006.

Fizičke i hemijske osobine su izuzetno značajne za dobijanje odgovarajuće smeše. U tabeli 2.1 je dat pregled osnovnih fizičkih i hemijskih osobina.

Tabela 2.1. Fizičke i hemijske osobine komponenata (Nazir, 2007)

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

Kompatibilnost komponenata je takođe značajna za dobijanje homogene mešavine. Da bi komponente bile kompatibilne neophodno je da budu ispunjena dva uslova: da profil veličine čestice jedne komponente obuhvata i druge komponente i da su gustine komponenti istog reda, Anon 2002; Đuragić 2011.



Slika 2.5. Primeri sposobnosti mešanja prema raspodeli veličine čestica,

Anon 2002; Đuragić 2011

Vreme mešanja je od izuzetnog značaja za kvalitet smeše. Kratko vreme mešanja dovodi do loše izmešanosti, tj. loše homogenizacije smeše, dok previše dugo vreme dovodi do deformacije čestica, tj. do razmešavanja smeše. Neophodno je stoga odrediti optimalno vreme mešanja.

Redovna procena kvaliteta mešanja u određenoj mešalici treba da bude postignuta analizom serije uzoraka za određeni indikator mešanja i izražavanjem rezultata preko koeficijenta varijacije. Relativna standardna devijacija (RSD) 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 i sar., 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.

### 2.3.3. Klasifikacija mešavina

Mešavine se generalno dele na dve grupe *Ponomarev*, 2006:

- mešavine kod kojih materijal slobodno pada i
- kohezivne mešavine.

Mešavine kod kojih materijal slobodno pada omogućavaju pojedinim česticama da se slobodno kreću nezavisno jedne od drugih.

Na suprot tome kohezivne mešavine u sebi obuhvataju čestice koje su međusobno povezane mehanizmima koji sprečavaju česticama da se kreću nezavisno jedna od druge, umesto toga one se kreću u okviru klastera (aglomerata) koji ih povezuje (*Fan i sar.*, 1990).

Suštinska razlika između ove dve vrste mešavina nije jasno određena, neki autori je zovu i maglovitom (*Fan i sar.*, 1970; *Geldhart i sar.*, 1984; *Harnby i sar.*, 1985).

### 2.3.4. Karakteristike smeša

#### 2.3.4.1. Uniformnost i homogenost

*Fan i sar.* (1970) su definisali homogenu mešavinu sistema čestica u kojoj su koncentracije komponenata uniformne u celoj mešavini. Idealna prostorna raspodela čestica koje sačinjavaju smešu u mešavini dve komponente, tj. binarnoj mešavini, može se okarakterisati kao ona mešavina u kojoj su sve čestice jedne komponente regularno ili jednako raspoređene među česticama druge komponente u bilo kom delu mešavine. Homogenost mešavine čvrstih komponenata ili raspodele njenog sastava se obično kvantifikuje tzv. indeksom mešanja. *Fan i sar.*, 1979; *Fan i sar.*, 1990).

*Veidenbaum i Bonilla* (1955) su definisali stepen pomešanosti kao odnos teoretski izračunate standardne devijacije za potpunu mešavinu i eksperimentalno određenu standardnu devijaciju za nepotpunu mešavinu, pri čemu se uzimaju odgovarajući uzorci smeše u toku mešanja. Nepotpuna smeša definiše se kao bilo koja smeša koja je u međustanju, tj. između potpune segregacije i potpuno slučajno odabranog stanja. (*Akao i sar.*, 1976; *Shindo i sar.*, 1978; *Fan i sar.*, 1990; *Fan*, 2001). To stanje može da bude posledica prvobitne razdvojenosti komponenti ili posledica spontane segregacije. Stepem pomešanosti meren različitim indeksima mešavine pokazuje karakteristike stvarnog stanja između dva ekstrema. Parcijalna segregacija mešavine se definiše kao mešavina koja nije potpuno homogenizovana; ona u jednom trenutku može biti homogenizovana, a da naknadno dođe do segregacije (*Shindo et al.*, 1978; *Too et al.*, 1979; *Fan*, 2001). Stepem segregacije ili intenzitet segregacije se koristi za određivanje stvarnog stanja između potpune segregacije i potpuno nasumičnog stanja. U proizvoljno izabranom stanju, raspored pojedinačnih čestica jedne komponente je potpuno nasumično raspoređen između čestica druge komponente. Nasuprot tome, komponente u potpuno segregiranoj mešavini su jasno izdvojene u različitim delovima u seriji čestica, situacija uobičajena za period pre mešanja. Da bi se formirala mešavina, komponente se ubacuju u mešalicu u vidu slojeva kojim se razdvajaju od ostalih komponenti. Relativna pozicija, veličina i broj ovih slojeva i rastojanje između njih utiče na ostvarenu stopu mešanja.

Konfiguracija slojeva može se opisati stepenom segregacije. Stepem homogenosti mešavine se obično određuje predviđanjem uniformne koncentracije uzoraka.

Standardna devijacija koncentracije osnovne komponente u mešavini se računa na sledeći način (*Fan*, 2001):

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N}} \quad (2.1)$$

gde je:  $\sigma$  - standardna devijacija;  $x_i$  - koncentracija  $i$ -te komponente;  $\bar{x}$  - srednja vrednost  $x_i$ ;  $N$  - broj čestica cele smeše.

U savršeno homogenoj mešavini fluida  $\sigma$  je jednako 0; u mešavini sa potpunom segregacijom  $\sigma$  je maksimalno (*Fan et al.*, 1970; *Too et al.*, 1979; *Fan*, 2001). Maksimalno postignuti stepen pomešanosti odgovara potpuno nasumičnom rasporedu različitih čestica u konvencionalnoj mešalici. Polazeći od pretpostavke da je veličina čestica svake pojedinačne



komponente ista *Lacey* (1943, 1954) je pokazao da minimalna moguća standardna devijacija uzorka koncentracije za binarnu mešavinu se računa (*Fan*, 2001):

$$\sigma_r = \sqrt{\frac{p(1-p)}{n_p}} = \sqrt{\frac{\bar{x}(1-\bar{x})}{n_p}} \quad (2.2)$$

gde je:  $p$  - ukupan procenat čestica date komponente u celoj mešavini, koja je jednaka prosečnoj koncentraciji  $\bar{x}$  i  $n_p$  je broj čestica u svakoj seriji. Da bi vrednost  $\sigma$  bilo manje od  $\sigma_r$  potrebno je formirati idealno raspoređenu mešavinu, koja se postiže pravilnim rasporedom čestica. Međutim, idealan raspored je nestabilan ukoliko čestice mogu da se kreću međusobno bez značajnih ometanja. Vrednost  $\sigma$  za nepotpunu mešavinu je veća od  $\sigma_r$ . Što je veća segregacija, to je veća vrednost i za  $\sigma$ . Maksimalna vrednost standardne devijacije  $\sigma_o$  je za potpunu segregaciju mešavine i zavisi od prosečne koncentracije osnovne komponente (*Fan*, 2001).

$$\sigma_o = \sqrt{\bar{x}(1-\bar{x})} \quad (2.3)$$

Veoma često nije moguće odrediti standardnu devijaciju za celu smešu, nego se uzima uzorak. Veoma je bitno pravilno uzeti uzorak koji se koristi za određivanje kvaliteta mešavine. To znači da se merna nesigurnost može javiti zbog neadekvatnosti uzoraka,  $n_s$  na osnovu kojih se određuje standardna devijacija. Standardna devijacija se u tom slučaju određuje (*Fan*, 2001):

$$s_s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n-1} (x_i - \bar{x})^2}{n_s - 1}} \quad (2.4)$$

U poređenju sa mešavinom fluida, kvalitet mešavine čvrstih materija je teže odrediti, zbog diskretne prirode čestica i ograničenosti čestica i veličine uzorka.

Standardna devijacija zavisi od prosečne koncentracije osnovnih komponenti čestica i od relativne veličine uzorka. Za potpuno slučajnu smešu, u kojoj su čestice različitih komponenti identične po veličini i gustini, varijacija je minimizirana i može da se odredi matematički. Opšte pravilo je da se uzme dovoljan broj uzoraka iz dobro raspoređenih tačaka u reprezentativnim delovima smeše. Svaki uzorak mora da sadrži dovoljan broj čestica i takav broj može da se odredi (*Fan i sar.*, 1970; *Fan*, 2001).

### 2.3.5. Kriterijumi za utvrđivanje kvaliteta smeše

#### 2.3.5.1 Uzimanje uzorka

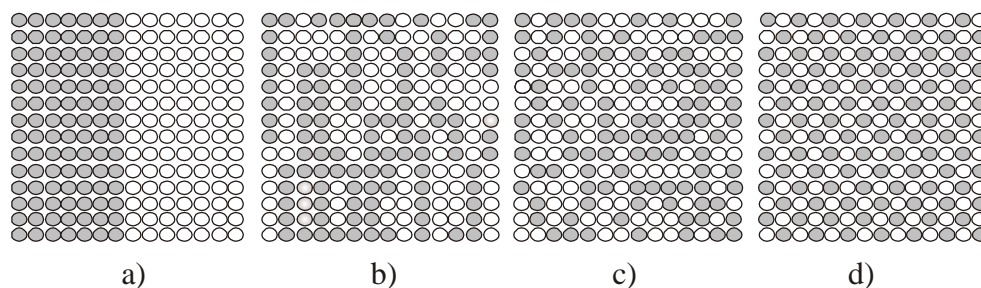
Jedan od najvažnijih problema u analizi mešanja je određivanje veličine, broja i mesta uzimanja uzoraka. Na osnovu analize uzoraka moguće je odrediti kvalitet umešanosti smeše, za svaki uzorak pojedinačno, a na osnovu tih vrednosti moguće je odrediti stepen mešanja za celu smešu, *Anon*, 2002. Na osnovu koncepta "pred-definisane mešavine" koji je razvio *Hersey*, 1975, na površinu grublje komponente smeše se nanosi finija komponenta, pri čemu se javljaju veze između ovih čestica različite finoće. Teorijske osnove opisivanja mikroskopske strukture mešavine postavili su *Wang i Fan*, 1976, ali se ovaj rad nije mnogo koristio zbog problema sa opisanim uzimanjem uzoraka i analize podataka. Napredak istraživanja u analizi slike znatno je doprineo boljoj analizi mešavine na osnovu analize slike, *Ghanem*, 2014. U ovom prilazu neophodno je definisati stepen mešanja preko koga se ocenjuje kvalitet mešanja. Koncentracija komponenata se često koristi kao karakteristika mešanja, a veličina uzorka mešavine određuje tačnost ocene koja se određuje za kvalitet mešavine. Što je veličina uzorka manja, veća je verovatnoća da će kvalitet ocene biti pogrešno ocenjen. Takođe, veličina uzorka ne može da se smanjuje u beskonačnost (najmanja zapremina uzorka je definisana veličinom čestice), ali ne može ni cela smeša da bude uzorak (tada je mešavina sigurno homogena), *Ghanem*, 2014. Zbog toga je izbor optimalne količine uzorka veoma važno za odgovarajuću analizu kvaliteta mešavine. Veličina uzorka može da se odredi na osnovu primene smeše. U farmaceutskoj industriji je veoma važno da su sve aktivne komponente jednako raspoređene u mešavini.

#### 2.3.5.2 Kriterijumi kvaliteta mešavine

Kvalitet smeša određuju i karakteristike opreme koja čini proizvodni proces (*Bridgwater*, 1994). Procesna oprema proizvodnog procesa uključuje: bunkere za skladištenje, sisteme za transport, same mešalice, uređaji za pražnjenje mešalice, i konačni deo postrojenja/fabrike u kome se proizvodi finalni proizvod: pakovanje u neki kompaktni ili bilo koji konačni oblik. Postoji mnogo različitih pristupa za određivanje kvaliteta smeše, što otežava analizu i poređenje dobijenih rezultata (*Kafarov*, 1985; *Makarov*, 1973; *Weinekotter*, 2000; *Wang*, 1978; *Fan*, 1990; *Kehlenbeck*, 2003).

U većini studija u literaturi (Gyenis, 1990; 1989, Wang, 1977; Fan, 1975) umešanost čestica u uzorku se uzima da bi se izračunala njihova varijacija od početnog stanja i da bi se odredila funkcija varijacije, kojom se opisuje kvalitet mešavine. Na ovaj način se neke karakteristike mešavine ne uzimaju u obzir. Gube se informacije o unutrašnjoj strukturi i stvarne koordinate pozicije odakle je uzorak uzet se zanemaruju. Preporučuje se da se uzima približno 40 uzoraka (Weinekotter, 2000), ali se obično uzima manji broj uzoraka.

Pošto je mešanje stohastički proces, procena dobijenog kvaliteta mešanja je zasnovana na statističkim metodama. Da bi se procenio kvalitet mešanja pomoću jedne stohastičke vrednosti, pretpostaviće se da je mešavina dvokomponentna (vidi sliku 2.6). Pretpostaviće se da je jedna komponenta osnovna komponenta, a da se ostale kombinuju u drugu komponentu. Dakle, na osnovu raspodele osnovne komponente u drugoj konvencionalnoj komponenti, moguće je ispitati kvalitet mešavine. Znači, koncentracija osnovne komponente u mikro zapremini je stohastička vrednost  $X$  za dvokomponentnu mešavinu. Ova diskretna stohastička vrednost se karakteriše zakonima distribucije, matematičkog očekivanja, odstupanja od standardne devijacije ili nekim drugim veličinama (Makarov, 1973).



Slika 2.6: Prikaz promene homogenosti u dvokomponentnoj mešavini (a- potpuno odvojeni, b - prelazno stanje, c - stohastička mešavina, d - idealna mešavina)

Najčešći način za procenu kvaliteta mešavine je standardna devijacija koncentracije osnovne komponente u uzorku uzetom iz mešavine. Standardna devijacija  $S$  se računa na osnovu eksperimentalnih rezultata prema sledećoj (Makarov, 1973; Boac, 2010):

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n-1} (X_i - \langle X \rangle)^2} \quad (2.5)$$

gde je:  $X_i$  - slučajna vrednost  $X$  u  $i$ -tom eksperimentu, u našem slučaju to je koncentracija osnovne komponente u uzorku  $i$ ,  $\langle X \rangle$  je aritmetička sredina vrednosti  $X$ , u našem slučaju to je aritmetička sredina koncentracije osnovne komponente u svim uzorcima,  $n$  - ukupan broj

uzoraka uzetih. Ako je broj uzoraka veliki, vrednost  $\langle X \rangle$  teži matematičkom očekivanju  $M$  slučajne vrednosti  $X$ . Standardna devijacija  $S$  zavisi od vrednosti  $\langle X \rangle$  i  $S$  ima svoju vrednost. Takođe postoje različiti kriterijumi za određivanje kvaliteta smeše kao stepen mešanja, relativna disperzija, smanjena standardna devijacija, itd. Varijansa se računa na sledeći način:

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (c_i - \langle c \rangle)^2 \quad (2.6)$$

gde je:  $n$  - broj uzetih uzoraka,  $C_i$  je koncentracija vrednost u uzorku  $i$ ,  $\langle C \rangle$  je prosečna koncentracija u svim uzorcima.

Glavna karakteristika je odnos promena oscilacija na ulazu u mešalicu i promena oscilacija na izlazu iz mešalice (Danckverts, 1995; Boac, 2010). Ova karakteristika se zove VRR (odnos smanjenja varijacije):

$$VRR = \frac{\sigma_{in}^2}{\sigma_{out}^2} \quad (2.7)$$

Odnos smanjenje varijacija se češće koristi od drugih kriterijuma, jer pokazuje efikasnost mešalice. Drugi kriterijum koji se često koristi u industriji za procenu kvaliteta mešavine je relativna standardna devijacija (RSD). On se računa prema sledećoj jednačini:

$$RSD = \frac{\sqrt{\sigma^2}}{\mu} \cdot 100\% \quad (2.8)$$

gde je  $\mu$  - prosečna koncentracija.

#### 2.4. Vrste mešalica i konstrukcija

Mešalice za praškaste materijale su relativno jednostavne i jeftine mašine, i klasifikuju se prema mehanizmu procesa mešanja koji se odvija u njima (Harnbi, 1992).

U tabeli 2.2 su prikazane vrste mešalica i mehanizam mešanja koji se odvija u njima.

Tabela 2.2. Mehanizmi mešanja u različitim tipovima mešalica

Mešalica	Mehanizam	Primer
Cilindrična mešalica	Difuziono i smičuće mešanje	Mešalica u obliku cilindra, konusna mešalica, V-mešalica
Konvektivna mešalica	Konvektivno i smičuće mešanje	Protivstrujna mešalica, mešalica sa lopaticama
Fluidizaciona mešalica	Difuziono i konvektivno mešanje	Brza mešalica AIRmix
Staička mešalica	Difuziono i konvektivno mešanje	Silomikser, Keniks i Ross mešalice

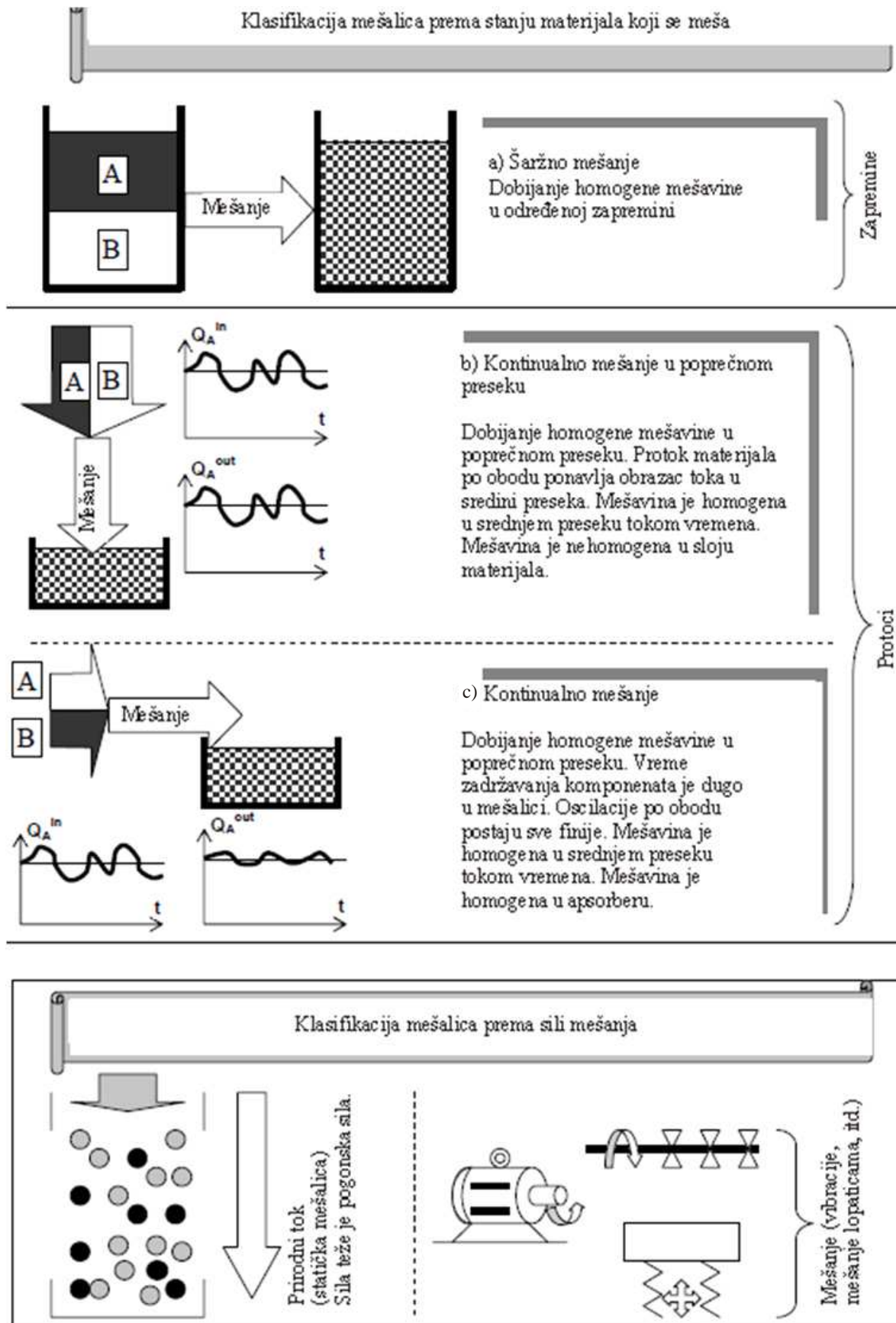
Da bi došlo do mešanja potrebno je obezbediti dva najvažnija uslova: kontakt između komponenti koje se mešaju i obezbediti silu koja pobuđuje sistem čestica, pod dejstvom koje dolazi do kretanja čestica. Moguće je klasifikovati mešalice po različitim kriterijumima, *Ponomarev, 2006.*

1. Granična površina između čestica može biti ostvarena tako što će komponente biti smeštene u određenim odeljcima. Ovaj tip mešalice ostvaruje mešanje periodičnim ubacivanjem materijala. Pošto se materijal sipa u mešalicu, mešalice počinje sa radom i dobija se homogena mešavina u celoj zapremini i u svim pravcima, slika 2.7a.

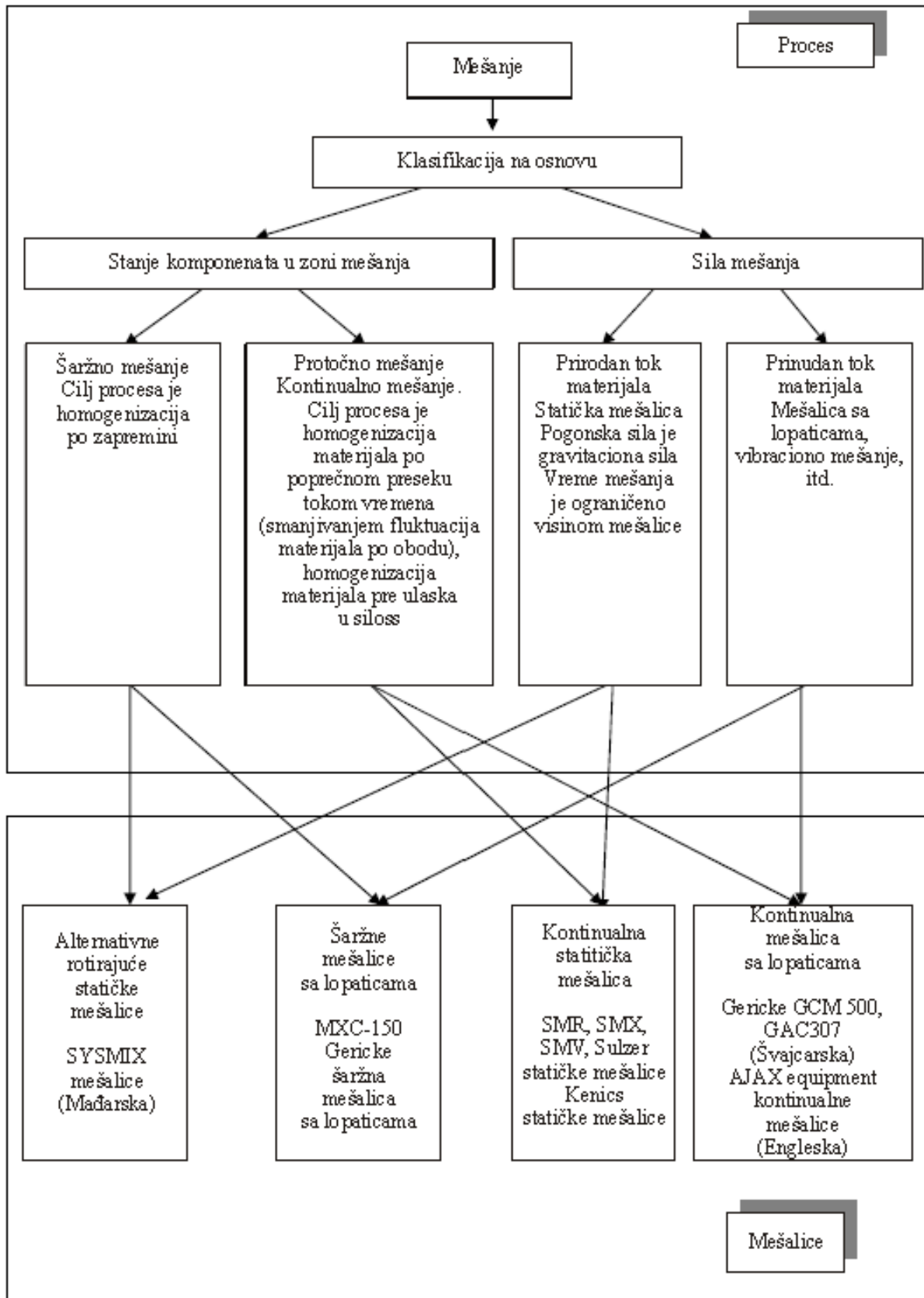
Kontinualno mešanje se karakteriše stalnim dodavanjem i izbacivanjem materijala iz mešalice. U ovom slučaju, od izuzetnog značaja je orijentacija usmerenosti čestica. Ako je usmerenosti čestica prema poprečnom pravcu, onda će se efektivno mešanje javiti u poprečnom pravcu aparature (slika 2.7b). Usmerenost čestica se može javiti u oba pravca: poprečnom i u aksijalnom i mešanje će se u tom slučaju obavljati u oba smera (slika 2.7c).

2. Da bi došlo do kretanja čestica, neophodna je sila pobuđenja da bi savladala početno trenje. To se postiže rotiranjem zapremine u kojoj se nalazi materijal, postavljanjem pokretnih lopatica unutar zapremine, izazivanjem vibracije, uspostavljanjem slobodnog pada čestica i slično (slika figure 2.7, na dnu). Usmerenost čestica zavisi od njenih fizičkih osobina, gustine, veličine, oblika itd.

Klasifikacija mešalice se može vršiti po različitim kriterijumima, na primer po konstrukciji mešalice razlikujemo: horizontamne, vertikalne mešalice i mešalice sa rotacionom osovinom, mešalicu sa jednom sekcijom, dve sekcije itd. Međutim, ovakva kvalifikacija ne daje nikakve informacije o suštini procesa i veoma se rekto koristi. Drugi metod klasifikacije je zasnovan na osobinama procesa (mešalice sa fluidizovanim slojem itd.). Ovaj metod klasifikacije je dobar sa stanovišta mehanizma mešanja, ali ne uzima u obzir različitost mešalice, *Ponomarev, 2006; Đuragić, 2011; Ghanem, 2014.*



Slika 2.7. Klasifikacija mešalica, Ponomarev, 2006



Slika 2.8. Klasifikacija mešalica prema stanju materijala koji se meša, Ponomarev, 2006

Na slici 2.8 je prikazana klasifikacija na osnovu stanja komponenti u zoni mešanja i pobudne sile. Oдавde se zaključuje da mešanje može biti šaržno ili kontinualno. Oba ova tipa mešanja koriste silu za pobuđivanje. Stoga, čestice mogu da se kreću pod uticajem sile gravitacije ili kretanje može biti izazvano delovanjem spoljne sile kao što je vibraciona sila, sile guranja, mešanja itd. Svaka mešalica može se svrstati u neku grupu na osnovu ovakve klasifikacije.

#### **2.4.1. Mešalice koje koriste silu agitacije**

Mešalica Gericke MXC-150 spada u grupu šaržnih mešalica u kojima se mešanje odvija u zapremini. Čestice se pobuđuju uz pomoć lopatica koje rotiraju unutar zapremine. Prvo se čestice ubacuju u zapreminu mešalice i mešanje počinje. Zatim se mešalica zaustavlja i mešalica se prazni (slika 2.9a).

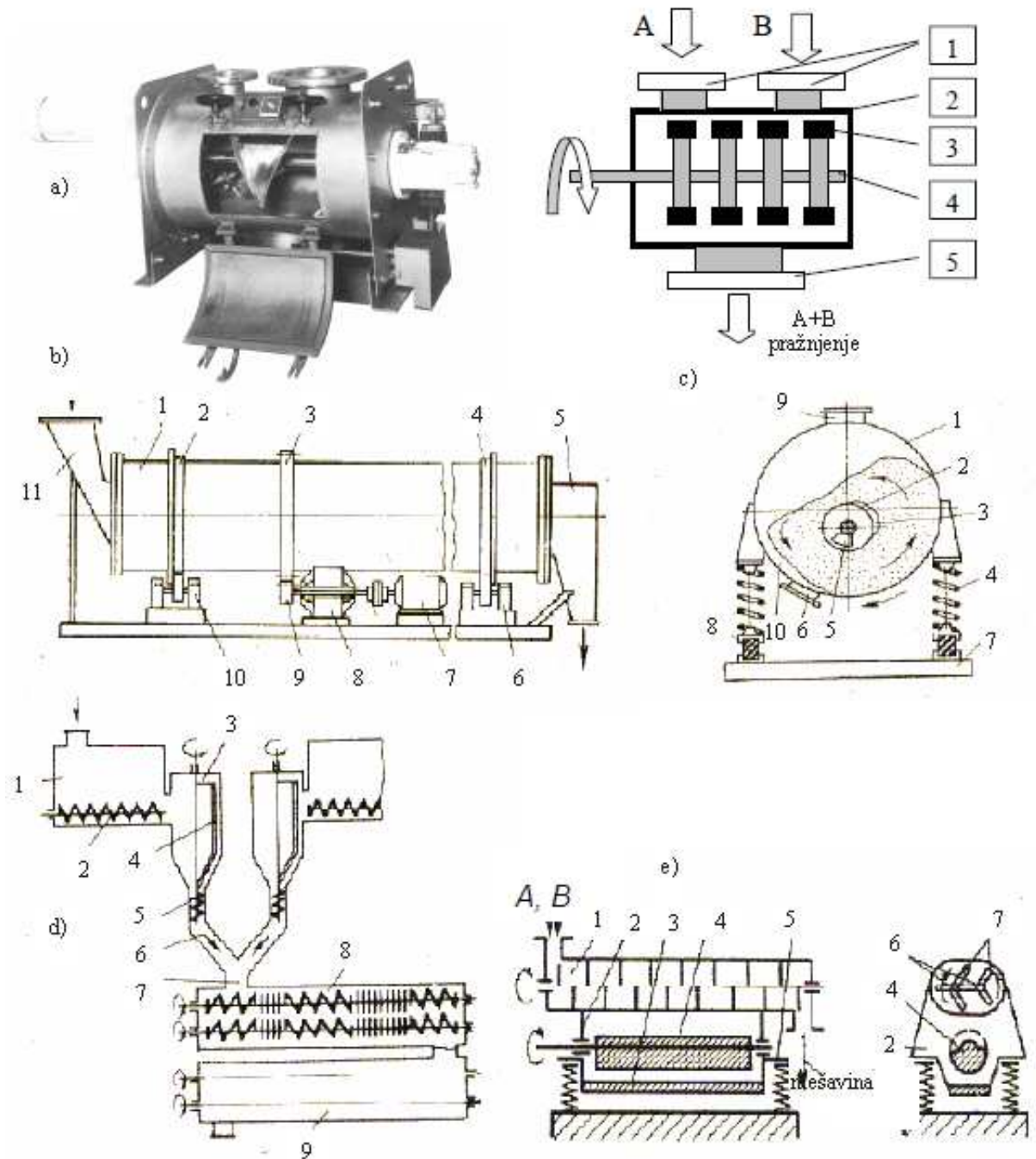
Cilindrične mešalice spadaju u grupu kontinualnih mešalica (slika 2.9 b) u kojima se čestice pobuđuju kretanjem. Dobošaste mešalice se obično proizvode kao cilindrične horizontalne ili pod uglom do 4°. Doboš rotira uz pomoć motora i mešavina se kontinualno prazni na drugom kraju mešalice.

Vibraciona mešalica je prikazana na slici 2.9 c i spada u kontinualne mešalice. Cev kroz koju protiče materijal se kreće ubrzano po krugu ili elipsi. Ubrzanje je toliko veliko da materijal pada sa zidova u jednom trenutku i u kontaktu je sa zidovima u drugom trenutku. Velika količina materijala tako cirkuliše u poprečnom preseku cevi u suprotnom pravcu od vibracionog motora. Aksijalno kretanje mešavine i mešanje nastaje kao rezultat razlike u visini u slojevima na mestu punjenja i pražnjenja.

Pužni transporter takođe spada u kontinualnu mešalicu (slika 2.9 d). Vratila se kreću uz pomoć električnog motora povezanog za redukcionu zupčanicu.

Vibraciona mešalica sa lopaticama, slika 2.9 c, e takođe spada u grupu kontinualnih mešalica. Mešalica ima dva vratila sa lopaticama i one rotiraju u suprotnom smeru. Prva grupa lopatica ima funkciju mešanja, a druga grupa ima funkciju guranje materijala kroz telo mešalice.





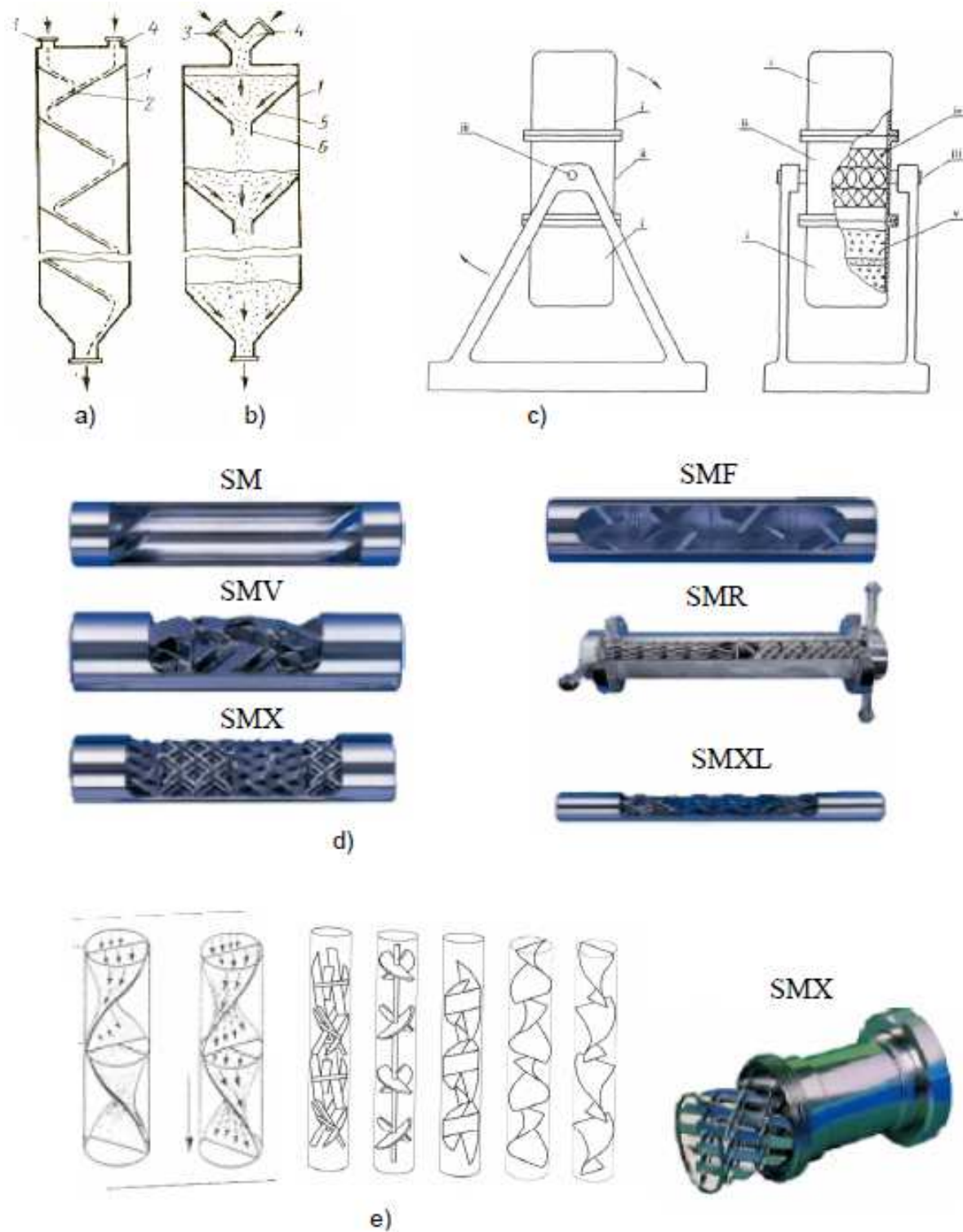
Slika 2.9. Mešalice koje koriste silu mešanja. a) šaržna mešalica Gericke MXC-150, b) kontinualna cilindrična mešalica, c) cevna vibraciona mešalica, d) pužna mešalica sa lopaticama, e) vibraciona mešalica DVS-N, *Ponomarev*, 2006

## 2.5. Statičke mešalice

Mešalice koje koriste silu gravitacije za kretanje čestica su statičke mešalice i često se koriste u procesnoj industriji i industriji hrane. Kontinualne statičke mešalice spadaju u grupu kontinualnih mešalica kod kojih je pobudna sila za kretanje čestica - sila gravitacije. Na slici 2.10a su prikazani primeri mešalica koje koriste silu gravitacije za mešanje. Komponente se mešaju zahvaljujući kretanju materijala, koje je izazvano delovanjem sile gravitacije, *Thakur*, 2003; *Ponomarev*, 2006.

Statičke mešalice su efikasni i jeftini uređaji za mešanje, koji imaju široku primenu. Statičke mešalice koriste silu gravitacije kao pogonsku silu za mešanje različitih komponenti. Osnovni parametri statičkih mešalica su broj elemenata za mešanje, brzina radnog fluida ili praškastog materijala, pad pritiska i karakteristike mešalice.

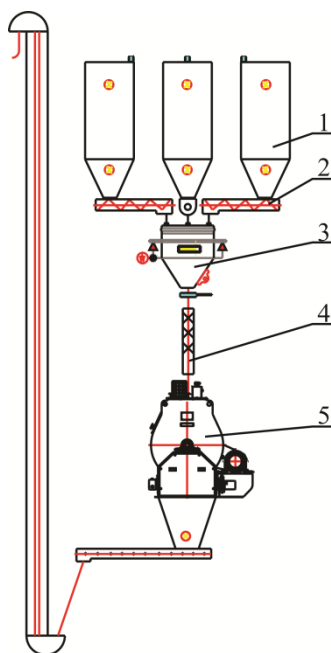
Pregled literature na polju statičkih mešalica uključujući i najnovija poboljšanja, kao i primenu u industriji su analizirani u *Thakur*, 2003. Statičke mešalice su se prvi put pojavile u industrijskoj primenu 70-tih godina prošlog veka. Prvi primer ovakve mešalice je patent opisan kao element, bez pokretnih delova koji se koristio za mešanje vazduha i gasovitih goriva, *Sutherland*, 1874. U literaturi se pominje i jedna mešalica sa spiralnim elementima koji su postavljeni da bi se poboljšalo mešanje u cevi, *French Patent*, 1931, kao i jedan drugi francuski patent koji se koristio za mešanje čvrstih materijala, *Bakker*, 1949. Elementi koji se koriste za provođenje toplote su patentirani ranih 1950-ih, *Lynn*, 1958. Prva komercijalna primena ovakvih uređaja je bila u petrohemijskoj industriji, (*Stearns*, 1953; *Veasey*, 1968; *Tollar*, 1966). Danas postoji više od 30 komercijalnih modela na tržištu.



Slika 2.10. Mešalice koje koriste silu gravitacije za mešanje. a) kontinualna gravitaciona mešalica sa kosim površinama, b) kontinualna gravitaciona konusna mešalica, c) obrtna statička mešalica, d) različita statičke mešalice iz firme Sulzer, e) elementi za mešanje u statičkim mešalicama, *Ponomarev, 2006*

Detaljan pregled statičkih mešalica, uzimajući u obzir mehanizam, upotrebu i karakteristične metode vezane za mešanje i prenos mase su dati u *Ghanem*, 2014. Statičke mešalice obično su u obliku cevi ili kanala koji imaju specifičnu geometriju, koja utiče na strukturu strujanja praškastog materijala u toku strujanja kroz mešalicu, pri tome poboljšavajući prenos mase i toplote u poprečnom preseku. Najpoznatije komercijalne mešalice su: (a) Kenics (Chemineer Inc.), (b) mešalice koje rade sa niskim padom pritiska (LPD) (Ross Engineering Inc.), (c) SMV (Koch-Glitsch Inc.), (d) SMX (Koch-Glitsch Inc.), (e) SMXL (Koch-Glitsch Inc.), (f) ISG (Ross Engineering Inc.), (g) HEV Chemineer Inc., (h) Inliner serija 50 (Lightnin Inc.); (i) Inliner serija 45 (Lightnin Inc.); (j) Komax (Komax systems Inc.); (k) SMR (Koch-Glitsch, Inc.). U radu *Rafiee*, 2013 analizirano je laminarno strujanje Njutnovskih i ne-Njutnovskih fluida velike viskoznosti u Kenics statičkoj mešalici. Geometrija Kenics mešalice se sastoji od spiralnih lopatica pričvršćenih za cilindričnu cev. Kvantitativno poređenje performansi statičkih mešalica je detaljno analizirano u radu *Meijer*, 2012. U ovom radu upoređene su različite mešalice pri laminarnom režimu strujanja da bi se odredila optimalna konstrukcija korišćenjem dva kriterijuma: pad pritiska i dužine. Osnovne promenljive za statičku mešalicu su: prečnik mešalice i broj elemenata.

Tipična industrijska primena statičke mešalice je data na slici 2.11. Pužni transporter se koristi za transport materijala do mešalice. Pre nego što počne proces mešanja, pred-mešanje se obavlja korišćenjem statičke mešalice.



Slika 2.11. Primer industrijske primene statičke mešalice, (1) silos, (2) pužni transporter, (3) doziranje, (4) statička mešalica, (5) mešalica, *Jovanović i sar.*, 2014

Detaljan prikaz prethodnih rezultata u oblasti mešanja praškastih i granulastih materija je dao *Bridgwater*, 2012. Akcenat u ovome radu je stavljen na radove vezane za matematičko modelovanje i numeričku simulaciju korišćenjem DEM analize. DEM se koristi za opisivanje strujanja 10.000-250.000 čestica. U budućnosti ovih istraživanja navedeno je da će se ispitivati uticaj veličine čestica, gabariti opreme i vršiče se optimizacija unutrašnje geometrije opreme. Cilj nekih drugih istraživanja je bio da se objasne inženjerski principi za opštu upotrebu DEM i pri tome je dat pregled radova diskretne simulacije čestica u poslednje dve decenije, *Zhu i sar.*, 2008. Ova istraživanja su podeljena u tri oblasti: pakovanje čestica, kretanje čestica i strujanje fluida i čestica. Naročito je obrađena mikro dinamika uključujući sile interakcije između čestica, čestica i fluida i čestica i zida. Metod tzv. mekane sfere (engl. soft sphere) koji su prvobitno razvili *Cundall i Strack* (1979) je prva tehnika dinamičke simulacije objavljena u literaturi. DEM je numerička metoda koja se koristi za predviđanje kretanja i sudara čestica prilikom transporta materijala. Kretanje svaka čestice se prati i modeluju se svi sudari između čestica međusobno i između čestica i zidova. Čestice mogu da se preklapaju, a stepen preklapanja se koristi pri matematičkom modelovanju korišćenjem zakona kontaktne sile za određivanje trenutne pozicije, orijentacije i brzine čestica. U ovom radu je korišćen linearni model opruga-prigušivač (engl. linear spring-dashpot model). Pri ovakvom pristupu matematičkom modelovanju, dozvoljeno je da čestice trpe kratkotrajne deformacije, a te male deformacije se koriste za računanje elastičnih, plastičnih i sila trenja između čestica. Kretanje čestica se opisuje Njutnovim zakonima kretanja. Ovaj pristup je karakterističan po tome što uzima u obzir višestruke kontakte, koji su značajni za modelovanje kvazistacionarnih sistema.

*Zhu i dr.*, 2008, su razvili spregnuti model DEM i CFD, kako bi pratili uticaj strujanja fluida na kretanje čestica. Ovakav pristup se bazira na detaljnoj mikroskopskoj analizi i informacijama o silama koje deluju i trajektorijama određenih čestica. U ovom slučaju opisana su tri bitna aspekta problema: 1. model za određivanje sila između čestica, kao i 2. sila interakcije čestica i fluida i 3. sprezanje diskretnih elemenata sa numeričkom dinamikom fluida, tj. povezivanje diskretnog i kontinualnog modelovanja. Pregled najznačajnijih rezultata iz oblasti modelovanja kretanja čestica u statičkim mešalicama primenom DEM za različite geometrije dati su u radovima *Pierce*, 2004; *Lemieux*, 2008; *Neuwirth*, 2013; *Tsuju*, 1993; *Liu*, 2013. U ovim radovima vršeno je modelovanje strujanja fluida i uzet je u obzir uticaj dinamike fluida na kretanje čestica. *Pierce*, 2004 je sproveo numeričku simulaciju međučestične filtracije. Koristio je *Ataska* kod koji su razvili *Cundall i Strack*, sa

standardnim jednačinama i parametrima materijala koje su definisali u kodu. Mnogo zahtevnija, u računarskom smislu, je bila studija o ponašanju čestica u V-mešalici primenom DEM, koju su razvili *Lemieux i sar.*, 2008. Oni su povećali dužinu mešanja na 120 s i broj čestica na 225.000, što je do sada maksimalna vrednost ikada objavljena. *Neuwirth i sar.*, 2013 su proučavali dinamiku fluida i čestica u rotoru sistema za granulaciju. Radi se o spregnutom 3D CFD pristupu za gasnu fazu spregnutu sa DEM. Fizičke osobine i sudari čestica su proučavani eksperimentalno i ubačeni u viskozno-elastični kontaktni model čestice. Spregnuti CFD/DEM model su prvi predstavili *Tsuji i sar.* 1993 i *Liu i sar.*, 2013 za složene geometrije, pri čemu je DEM kod spregnut sa komercijalnim ANSYS/Fluent softverom korišćenjem za tu svrhu napisane funkcije (engl. User Defined Function). Primenjen je Eulerov višefazni model iz Fluent-a i spregnut sa DEM analizom, pri čemu se Fluent-ova sekundarna faza ponaša kao duh faza (engl. ghost phase), kao kopija polja dobijenog DEM analizom. *Chu i sar.*, 2011 su uradili numeričku studiju gasa i čvrstih materija u gasnom ciklonu. Oni su koristili kombinovani DEM i CFD pri čemu se kretanje diskretne faze čestica dobija DEM analizom, primenjujući Njutnove jednačine kretanja na svaku pojedinačnu česticu, a strujanje kontinualnog fluida određuje se tradicionalnim CFD pristupom, pri čemu se rešavaju Navije-Stoksove jednačine za svaku ćeliju kontinuma. *Su i sar.* 2011 su koristili OpenFOAM softver za sprezanje DEM i CFD. *Remy i sar.*, 2011 su ispitivali strujanje i segregaciju poludisperznih sfernih čestica u mešalici eksperimentalno i tehnikama proračuna. Numerička simulacija je pokazala da se stepen segregacije može smanjiti upotrebom srednjih čestica između najmanjih i najvećih čestica. Na ovaj način se povećava konvektivno i difuzivno mešanje i smanjuje segregacija.

Lagrange-ova tehnika praćenja se koristi u mnogim studijama da bi se odredile karakteristike procesa mešanja u različitim sistemima, *Hobbs*, 1998; *Kumar*, 2008.

Detaljan pregled i definicija kvaliteta mešanja, mehanizma mešanja, mogućnosti izbora mešalice, kao i ispitivanje homogenosti mešanja dati su u *Poux*, 1991.

## 2.6 Pužni transporter, pužne mešalice

Pužni transporteri se široko koriste za transport i/ili podizanje rasutog materijala u kontrolisanim uslovima, nepromenljivom brzinom. Pužni transporteri se koriste u različitim granama industrije, kao što su rudarstvo, poljoprivreda, građevinarstvo, hemijska industrija, procesna i prehrambena industrija.

Pužni transporteri su takođe poznati kao zavojni transporteri, a koriste se za materijale koji mogu da slobodno teku. Moderni transporteri se sastoje od pužne spirale U-oblika koja rotira u otvorenom koritu ili zatvorenoj cevi. Oni se mogu koristiti u horizontalnom položaju ili pod nagibom za podizanje praškastog/granulastog materijala. Pužni transporteri nisu efikasni kao trakasti transporteri. Razlog za slabiju efikasnost je trenje između čvrstog materijala i zavojne površine puža. Ali, oni su jeftiniji i lakši za održavanje. Oni se koriste za prenos materijala na malim razdaljinama, ili kada je potrebno neko malo podizanje materijala, *Towler*, 2013.

Postoje različite konstrukcije pužnih transportera, sa istim ili promenljivim korakom. Pravilna konstrukcija pužnog transportera je od ključnog značaja za učinak transporta. Ako dizajn nije adekvatan za transport materijala, mogu se javiti određeni problemi: udari i nestabilan protok, netačno merenje i doziranje, nehomogenost proizvoda, deformacije ili lomljenje granula, degradacija proizvoda, prekomerne opterećenje motora tokom rada, visok početni obrtni momenat, izraženo habanje oprema, kao i promenljivo vreme zadržavanja i segregacija materijala, povećavana potrošnja energije, povećanje troškovi finalnog proizvoda, smanjenje kvaliteta finalnog proizvoda itd., *Jovanović i sar.*, 2014.

Specifičnost u obliku čestica i razlika u težinama čestica koje se mešaju imaju veliki uticaj na eventualno odvajanje (segregaciju) praškastog materijala pri transportu pužnim transporterima. Međutim, dužina pužnog transportera je takođe veoma važan parametar za projektovanje. Proizvođači imaju probleme pri povećanju dužine pužnog transporter, naročito zbog deformacije koje nastupaju na dugim vratilima pužnog transportera, u kom slučaju su potrebni dodatni nosači između početnog i krajnjeg pakovanja ležajeva, *Jovanović i sar.*, 2014.

Pregled aktuelnih metoda projektovanja i probleme na koje se nailazi pri projektovanju pužnih transportera mogu se naći u *Bortolamasi*, 2001. Opis teorijskog ponašanja pužnog transportera može se naći u brojnim člancima (*Yu*, 1997; *Robbets*, 1999).

Ispostavilo se da je numerički model na bazi metode diskretnih elemenata (engl. Discrete Element Method) pouzdan i koristan za praćenje interakcija čestica i predviđanje procesa mešanje kod praškastih i granuliranih materijala. Metoda tzv. soft - sfera, koja je prvobitno razvijena od strane *Cundall i Strack* (1979) je bila primenjena za simulaciju dinamike zrnastih materijala i ta tehnika je prva koja je objavljena u slobodno pristupačnoj stručnoj literaturi.

DEM je numerička tehnika koja se koristi za predviđanje ponašanja sudara čestica tokom transporta i/ili mešanja. Pri kontinualnom protoku čestica prati se položaj svake čestice i modeluju se svi sudari čestica i granica. Čestice mogu da se preklapaju, a na osnovu zakona kontaktne sile dobijaju se trenutne vrednosti sile na osnovu trenutnih položaja, orijentacije, brzina i ugaonih brzina čestica, (*Cundall i Strack*, 1979).

DEM proračun za protok čestica u pužnom transporteru je prvo prikazan u radu *Shimizu*, 2001. U ovom radu, ispitivane su performanse horizontalnih i vertikalnih transporterata, i modeli su verifikovani poređenjem sa empirijskim jednačinama. U članku *Owen*, 2003, prikazana je upotreba modela periodičnog preseka (engl. periodic slice model), na istraživanje performansi pužnog transporterata velike dužine. *Cleary*, 2004, je koristio DEM analizu za proučavanje profila toka kod pužnog transporterata nagnutog pod uglom od 45°. Ovaj rad je nastavak rada *Cleary*, 2007, u kome se ispitivao uticaj oblika čestica na protok iz silosa, i na karakteristike pužnog transporterata. U članku *Hou*, 2014, urađena je DEM studija protoka kohezivnih čestica u pužnom dozatoru. Ispitivani su efekti kohezivne sile između čestica i rotacione brzine puža, kao i uticaj dužine puža u odnosu na popunjenost i konstrukciju silosa. Cilj ovog istraživanja je bio da se iznađu načini za rešavanja problema blokiranja izazvanog kohezijom čestica u silosu. U članku *Moysey*, 2005, izvršeno je modelovanje primenom DEM metode ubacivanja i transporta granulastih materijala u transporteru. Tehnika DEM omogućava detaljnu analizu lokalnih transportnih fenomena u pužnom kanalu. *Zhong i O'Callaghan*, 1990, su analizirali efekat obliku otvora dozatora na performanse horizontalnog pužnim transporterom. *Fernandez i sar.*, 2011, su ispitivali uticaj konstrukcije puža na slobodan pad sfernih čestica u horizontalnom pužnom transporteru. DEM se koristi za predviđanje putanje čestica u horizontalnom pužnim transporterima, uključujući transporterata sa promenljivim korakom i promenljivi prečnik puža. Ispitivan je uticaj izbora puža na maseni protok, ujednačenost doziranja praškastog materijala, potrošnju energije, habanje puža i varijacije u trenju materijala i zida. *Cleary*, 2013, koristi DEM analizu sa česticama realnog oblika za mešanje u pužnim transporterima. Koristeći mnogo realnije predstavljanje oblika čestica dolazi se do boljeg predstavljanja slojeva materijala, zbog povećanog broja kontakata sa susednim česticama. *Moysey i Thompson*, 2007, predložili su novi pristup modelovanju čvrstih materija unutar ekstrudera, korišćenjem metode diskretnih elemenata korišćenjem neizotemske, trodimenzionalne simulacije. Da bi poboljšali primenu DEM, isti autori određuju kontaktni mehanizam za izabrani polimer, *Moysey*, 2007. *Moysey i Baird*, 2009, koriste DEM za određivanje segregacije sfernih peleta od nikla u površinskom

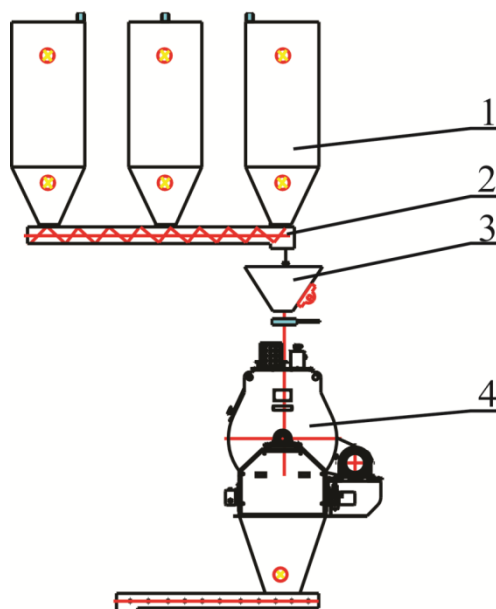


sloju. Spregnuti CFD (Computational Fluid Dynamics) i DEM pristup pokazao se kao pouzdanija i efikasnija numerička metoda, nego samo DEM analiza, za uređaje u kojima radni fluid ima značajan uticaj na ponašanje granularnog čestica, (*Neuwirth, 2013; Liu, 2013; Chu, 2011; Su, 2011; Remy, 2011; Jovanovic i sar., 2014*).

Pužni transporteri se takođe koriste za odmeravanje i doziranje male količine materijala, kao što su zrnasti materijali ili prah ili pigmenti iz rezervoara za skladištenje, (*Cleary, 1998; Roberts, 1962*). Dozatori hrane se često izvode dodavanjem frekventnih invertora za promenu brzine i fino doziranje. Pravilan izbor geometrije pužnog transportera je veoma važno u ovom slučaju. Značajno povećanje homogenosti i smanjenje segregacije materijala se može postići promenom geometriju puža, i dodavanjem nekoliko dodatnih elemenata zavarenih na pužnici.

Pužni transporteri se često koriste za izuzimanje praškastih ili zrnastih materijala iz silosa i rezervoara, i transportuju ga do mešalica. Sve pojedinačne komponente moraju da budu temeljno izmešane, kako bi se dobio homogen proizvod. Pre nego što počne proces mešanje, uobičajeno je da se obavi neka vrsta mešanja pre ulaska u mešalicu, koristeći neku vrstu pomoćne mešalice. Postoje specijalne vrste ovih predmešača koji se koriste u industriji.

Na slici 2.12 je dat tipičan primer predmešalice, koja se koristi za mešanje pre dolaska smeše u glavnu mešalicu. Ona se koristi i za mešanje različitih komponenti, kao i za transport smeše do glavne mešalice.



Slika 2.12. Primer primene modifikovanog pužnog transportera u industriji, (1) silos, (2) pužni transporter-predmešalica, (3) levak, (4) glavna mešalica, *Jovanović i sar., 2014*.

## 2.7 Primena DEM analize kao simulacije procesa mešanja

Monte Carlo metoda je numerička metoda koja uključuje uzrokovanje iz statističke raspodele, bilo teorijske, bilo empirijske, za aproksimaciju realnih fizičkih fenomena bez pozivanja na stvarne fizičke sisteme (*Fan i sar.*, 1970). Stohastička promena je najjednostavnija podgrupa Markovljevog niza, koji spada u grupu stohastičkih procesa. U ovom slučaju, stohastička promenljiva je pozicija čestice koja se kreće po pravoj liniji na takav način da čestica ostaje na istom mestu ili se kreće jedan korak u levo ili u desno u svakom koraku (*Parzen*, 1962).

### 2.7.1. Lagrange-ov i Euler-ov pristup modelovanju procesa mešanja

Postoje dva principa za modelovanje strujanja čestica ili mešanja praškastih materijala: Lagrange-ov model ili Euler-ov model.

Lagrange-ovi modeli su zasnovani na analizi kretanja pojedinačnih čestica pod dejstvom svih sila, uključujući i sudare između čestica i sudare između čestice i zida. Ovaj princip je poslednjih decenija veoma aktuelan, posebno sa razvojem metode diskretnih elemenata (DEM) ili simulacije diskretnih čestica (DPS). Neki od ovih rezultata se mogu naći u literaturi (*Kaneko i Shiojima*, 2000, ili *Mc Carthy i Ottino*, 1998). Ovaj pristup je naišao na veliku primenu za kretanje praškastih materija u struji fluida i za interakciju praškastih materijala pri kretanju. U ovom pristupu, prati se delić fluida čije se osobine onda definišu kao funkcije položaja tog delića u vremenu. Pri tome su prostorne koordinate položaja delića fluida funkcije vremena. Ovim pristupom, praćenjem kretanja delića fluida dobija se linija koja predstavlja trajektoriju ili putanju čestice fluida. Lagrange-ovim pristupom se takođe mogu definisati promene osobine delića fluida pri kretanju izvođenjem supstancijalnih izvoda. Koristi se koordinatni sistem koji se kreće u prostoru srednjom brzinom toka fluida. Shodno tome u Lagrange-ovom polju se vrši osrednjavanje po velikom broju fluidnih čestica. Ali, postoje neka ograničenja njegove primene na realne procese i opremu. Promena početnih uslova značajno utiče na rezultate nakon kratkog vremenskog intervala. Mnoge usrednjene vrednosti ostaju iste, ali je tada lakše raditi sa usrednjenim vrednostima. Takođe je teško pravilno opisati sve osobine svake čestice, interakcije svih čestica, a naročito su kompleksni fenomeni, kao što je aglomeracija, tj. nagomilavanje čestica. Ova pristup je i dalje problematičan za upotrebu.

Euler-ov pristup je zasnovan na usrednjenim vrednostima fizičkih osobina polja i pokazuje odstupanja od usrednjenih vrednosti. U ovom slučaju, analizira se deo prostora kroz koji fluid protiče pri čemu se definišu osobine fluida kao funkcije prostornih koordinata i vremena. Na taj način, mogu se odrediti vektori brzina sa svojim komponentama u funkciji prostora i vremena, koji onda čine polje brzina. Ovim pristupom definiše se strujna linija, ili strujnica, tj. linija čije tangente u svakoj tački predstalljaju vektore brzina fluida. Određuje se strujno polje u određenoj konačnoj zapremini. Ako je zapremina koja se posmatra dovoljno mala, problem se može opisati uz pomoć diferencijalnih jednačina. Međutim, definisanje male zapremine za realne čestice je problematično, jer čak za veoma male čestice beskonačno mala zapremina je velika. Prebacivanje na konačnu zapreminu je uvek zasnovano na usrednjavanju parametara unutar zapremine i osobina strujanja između granica zapremine. Ponekada se Euler-ov pristup koji se koristi na ovakav način zove stohastički pristup, jer se radi o stohastičkim komponentama kretanja određene faze. Zasnovan je na globalnoj prezentaciji mikroskopskih fenomena, kao što su koeficijent disperzije, koeficijent klizanja ili verovatnoća prelaza. Glavna prednost ovog principa je malo računarsko vreme i nezahtevna računarska oprema. Mana je nedostatak ulaznih fizičkih subjekata za računanje prelaza.

### 2.7.2. Istorijat i primena DEM analize

DEM (Discrete Element Method) je prvi put predstavljena od strane Cundall-a, (Cundall, 1971), kada je primenio računarski model za simulaciju kretanja sistema velikih stena. U modelu su korišćeni realni zakoni trenja i uprošćeni parametri krutosti između blokova stena. Računarski program je dozvoljavao individualno podešavanje efekata na kontaktima, parametre kontakata, kao i podešavanje uslova pri transportu materijala. Primena ovog programa je više bila bazirana na situacijama gde su naponi u stenama mali (kao u slučaju kada su stene pri iskopu čvrsto vezane), za razliku od slučaja gde su naponi u stenama veliki, kao kod podzemnih rudnika.

Od tada DEM se koristi široko za rešavanje raznih inženjerskih problema kao kod simulacije deformacije zemljišta i otporu prodiranja šipova (Tanaka i sar., 2000), realnog modela interakcije vozila i zemljišta (Horner i sar., 2001), modelovanje pešćanih modela (Maeda i sar., 2003), mlevenje rude u poluautomatskim mlinovima (Morrison i Cleary, 2004), u industriji velikih kapaciteta (Cleary, 2004), efektima podizanja (Đorđević, 2003) i vertikalnim i horizontalnim udarnim drobilicama (Đorđević i sar., 2003), utrošak energije

(Liry i sar., 2006a, b). DEM primene koje su vezane za mešanje čestica, *Hustrulid i Mustoe* (1996) su primenili ovaj metod da simuliraju kretanje grupe čestica na trakastim transporterima za izvoz materijala iz rudnika. Dobijene informacije su uključivale raspodelu brzina čestica u grupi i napone u njima, sile udara uzrokovane transportovanim materijalom koje deluju na elemente transportera i transportne trake. *Hustrulid*, 1998, sa uspehom simulira poziciju, brzinu i sile na svakoj čestici i granicama u intervalima  $10^{-5}$ s. *Dewicki*, 2003, takođe modeluje tačke na sistemima trakastih transportera koristeći DEM i simulira njihove karakteristike koristeći ih da unapredi konstrukciju, *Shimizu i Cundall*, 2001, ispituju karakteristike horizontalnih i vertikalnih pužnih transportera za čestice sferičnog oblika (simulacija praškastih materijala), primenom trodimenzionalnog DEM-a. Rezultati simulacije su se dobro slagali sa empirijskim jednačinama i predhodnim radovima na oba tipa pužnih transportera.

*Masson i Martinez*, 2000, su primenili DEM simulaciju na punjenje i pražnjenje česticama koje su bile predstavljene kao lopte (prečnik 10 mm i gustine  $1190 \text{ kg/m}^3$ ) u silosima kvadratnog poprečnog preseka. Dobijeni pritisak na zidove silosa na kraju punjenja je upoređen sa rezultatima dobijenim metodom konačnih elemenata, i uticaj trenja i krutosti čestica je takodje analiziran. Rezultati koji prikazuju ove parametre igraju glavnu ulogu u kinematici strujanja i raspodeli napona pri procesima punjenja i pražnjenja.

*Wightman i sar.*, 1998, primenjuje DEM za analizu mešanja čestica u rotirajućem cilindru. Poredeći čisto rotaciona kretanje sa kretanjem u kojoj su bili uključeni i međusobni kontakti čestica. Uključujući u proračun i kontakte između čestica drastično su poboljšali kvalitet rezultata. Oni su ovom metodom takođe dobili teško merljive podatke u eksperimentima. Neke važne karakteristike dvofaznih mešavina koje se odnose na efekte razdvajanja u statičkim mešalicama, dobijene su ovom metodom. Time se poboljšalo mešanje u aksijalnom pravcu statičkih mešalica i drugih procesa pri pneumatskom transportu.

*Ketterhagen i sar.*, 2008, ispituje uzroke razdvajanje (separacija) granuliranog materijala iz levka koristeći DEM. Urađen je kvazi 3D model konusnog levka pravougaonog poprečnog preseka koristeći dve paralelna periodična granična uslova. Pronađeni su ključni faktori koji utiču prilikom pražnjenja levka a to su: odnos prečnika čestica, masene frakcije, odnos izlaznog preseka levka i prečnika čestica, koeficijent trenja klizanja, ugao zida levka i hrapavost levka.

Neki od najnovijih razvojnih programa DEM-a uključuju različite oblike čestica i njihove konfiguracije.

- elipsoidne čestice (*Ting i sar.*, 1993; *Vu-Quoc i sar.*, 2000; *Ng*, 2001)
- osno simetrične i nesferične čestice (*Favier i sar.*, 1999, 2001)
- čestice proizvoljnog oblika (*Kremmer i Favier*, 2000, 2001a, b)
- čestice koje nisu sferičnog ili cilindričnog oblika (*Mustoe i Miyata*, 2001)
- cilindrične ili sferične čestice raznih dimenzija slepljene zajedno (*Potyondy i Cundall*, 2004).

### 2.7.3. Materijal čestica i njihove interakcije važne za DEM modelovanje

U DEM modelima variraju se razni parametri za simulaciju modela. Najčešće korišćene parametre možemo podeliti u dve kategorije: karakteristike materijala i karakteristike interakcija (*Mohsenin*, 1986; *Vu-Quoc i sar.*, 2000; *Raji i Favier*, 2004. a, b).

Karakteristike materijala mogu se definisati kao suštinske karakteristike čestice. To su oblik, veličina, gustina, Poasonov koeficijent i modul smicanja.

Karakteristike interakcija koje čestice pokazuju u kontaktu sa granicama, površinama i sa drugim česticama. To su koeficijent restitucije i koeficijent trenja pri klizanju i kotrljanju (*LoCurto i sar.*, 1997; *Chung i sar.*, 2004).

#### 2.7.3.1. Oblik i veličina čestice

Oblik i veličina čestice su nerazdvojive fizičke karakteristike čestica. U definisanju oblika neke dimenzione karakteristike moraju se meriti. *Mohsenin*, 1986 i *Nelson*, 2002, su merili tri ortogonalno postavljene dimenzije 50 čestica nasumično odabranih iz materijala da bi definisali oblik i dimenzije čestica. Zapremina je takođe jedan od parametara da bi se definisala dimenziju čestice, a tri međusobno ortogonalne ose da bi se definisao oblik.

#### 2.7.3.2. Gustina čestica

Gustina čestica ( $\rho_p$ ) je definisana merenjem zapremine koju zauzimaju čestice u uzorku uzetom nasumično iz materijala. *Nelson*, 2002, je merio zapreminu približno 20-25 gr uzorka Bekmanovim piknometrom. Gustina čestica je računata deljenjem izmerene mase sa zapreminom.

### 2.7.3.3. Poasonov koeficijent i moduo smicanja čestica

Poasonov koeficijent ( $\nu$ ) je apsolutna vrednost odnosa deformacije u dva ortogonalna pravca uzrokovane rezultujućim ravnomerno raspoređenim naponom vrednosti ispod granice proporcionalnosti za dati materijal, *Mohsenin*, 1986. Na osnovu Hukovog zakona i uzimajući u obzir Poasonov koeficijent moduo smicanja ( $G$ ) za elastičan homogen izotropan materijal je odnos napona tangencionalno na ravan gde deluju sile i deformacije. Moduo smicanja se definiše i iz relacije.

$$G = \frac{E}{2 + 2\nu} \quad (2.9)$$

Više vrednosti Poasonovog koeficijenta i Jangovog modela elastičnosti za različite vrste žitarica i uljarica data su u literaturi (*Misra and Young*, 1981; *Mohsenin*, 1986; *Bilanski et al.*, 1994; *Vu-Quoc et al.*, 2000; *Chung et al.*, 2004; *Raji and Favier*, 2004a, b; *Molenda and Horabik*, 2005; *Chung and Ooi*, 2008; *Boac*, 2010). Jednačine za ove vrednosti bazirane su na Hercovim jednačinama kontaktnih napona korišćenim u mehanici čvrstih tela kojima se pretpostavlja da su deformacije male i da je materijal elastičan (*Boac*, 2010). U svakom slučaju one su korisne za pravljenje poređenja ponašanja deformisanih viskoelastičnih materijala poput semena, kada su deformacije i opterećenja jednaka za sve uzorka koji se testiraju.

### 2.7.3.4. Koeficijent restitucije čestica

Za određivanje koeficijenta restitucije ( $e$ ) korišćene su razne metode (*Sharma i Bilanski*, 1971; *Smith i Liu*, 1992; *Yang i Schrock*, 1994; *LoCurto i sar.*, 1997). *Smith i Liu* (1992) dobijali su vrednosti koeficijenta restitucije na tri načina: a) odnos normalne komponente impulsa prilikom pritiska i restitucije; b) odnos normalne komponente brzina pri udaru i odbijanju (*Sharma i Bilanski*, 1971; *Yang i Schrock*, 1994); c) odnos rada normalnih komponenti sila reakcije u tački kontakta u pritisnoj fazi i rada u restitucionoj fazi (*LoCurto i sar.*, 1997).

*LoCurto i sar.*, 1997 je opisao  $e$  kao kvadratni koren totalne kinetičke energije i posle udara u koji nisu uključeni tangencioni frikcionni gubici. Oni su merili koeficijent restitucije ( $e$ ) pri udaru zrna soje u aluminijum staklo i akrilne površine koja padaju sa visina 151, 292 i 511 mm, sa sadržajem vlage od 10,7 % i 15,5%.

Vrednost koeficijenta restitucije ( $e$ ) opada sa povećanjem sadržaja vlažnosti i visine pada. Udar u aluminijum daje najviše vrednosti. Visine pada i odbijanja su merene samo za ona zrna soje koja su imala minimalnu rotaciju i čije trajektorije pri odbijanju su skoro vertikalne. Ovo se razlikuje od rezultata iz rada *Yang-a i Schrock* (1994), koji su uključili i slučajevne semena sa i bez rotacije.

Pretpostavljajući da nema gubitka energije sem pri kontaktu, vrednost ( $e$ ) se izračunava kao odnos između kvadratnog korena početne visine ( $H_i$ ) i visine odbijanja ( $H_r$ ) (*LoCurto i sar.*, 1997; *Zhang i Vu-Quoc*, 2002):

$$e \equiv \left( \frac{KE_r}{KE_i} \right)^{\frac{1}{2}} \equiv \left( \frac{H_r}{H_i} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.10)$$

### 2.7.3.5. Statički koeficijent trenja

Koeficijent trenja ( $\mu$ ) je odnos sile trenja prema normalnoj sili ( $F$ ) koja deluje na površinu kontakta ( $W$ ) (*Mohsenin*, 1986):

$$\mu = \frac{F}{W} \quad (2.11)$$

Sile trenja deluju između površina u mirovanju, a takođe postoji i između površina u relativnom kretanju, koje se respektivno nazivaju statičko i kinetičko trenje. Statički i kinematički koeficijent trenja mogu se obeležiti kao  $\mu_s$  i  $\mu_k$ , respektivno (*Mohsenin*, 1986).

Neki koeficijenti statičkog trenja u kontaktima seme-seme i seme-površina, kao što su niskougljenični čelik, nerđajući čelik, akril, aluminijum i staklo, kao i statičko trenje sojinog semena o čelik je 67% vrednosti trenja semena o drugo seme su navedeni u literaturi *Stahl*, 1950.

### 2.7.3.6. Koeficijent trenja kotrljanja čestica

Koeficijent trenja kotrljanja ( $\mu_r$ ) se definiše kao odnos sila trenja i sila normalnih na površinu kontakta koje sprečavaju kotrljanje čestica. Trenje kotrljanja ili otpor može biti spreg (ili moment) koji se može prenositi između čestica kontaktom i ovaj par se opire rotaciji (*Jiang i sar.*, 2005) bez uticaja na translaciju. On može postojati čak i kod kontakta čestica cilindričnog oblika (*Bardet i Huang*, 1993). Koncept uključivanja u razmatranje trenja

kotrljanja u kontaktu čestica je alternativni pristup u DEM modelovanju, primenom koga se teži pronalazenju zakonitosti vezane za rotaciju čestica (*Jiang i sar.* 2005), umesto korišćenja modela čestica koje nemaju sferičan oblik i na taj način onemogućilo kotrljanje čestica i dobio realističan pristup ponašanju čestica materijala koje se kotrljaju (*Rothenburg i Bathurst*, 1992; *Sawada i Pradhan*, 1994; *Ting i sar.*, 1995; *Ullidtz*, 1997; *Thomas i Bray*, 1999; *Ng*, 2001; *Mirghasemi i sar.*, 2002; *Mustoe i Miyata*, 2001). U mikromehaničkom modelu *Jiang* (2005), sastavljenom od osnovnih elemenata, kao što su opruga i prigušivač postavljenih paralelno na gredi, doprinose kretanju u obliku kotrljanja kod kontakta između čestica. Trenje kotrljanja direktno utiče samo na ugaono kretanje, a ne i na translatorno kretanje čestica.

*Zhou* (2002) je istraživao efekat uticaja trenja kotrljanja na promenu ugla mirovanja grubih staklenih perli. Početna vrednost koeficijenta trenja kotrljanja perli je bila jednaka 0,05 (raspon je od 0-0,1) u kontaktu čestice sa česticom (perle sa perlom) i dva puta veći za kontakt čestice sa zidom u njihovoj simulaciji. Autori su našli da povećanje oba trenja kotrljanja povećava ugao mirovanja. Ovo nastaje stoga što sile otpora rotacionom kretanju sfera, daju efekat utroška kinetičke energije, zaustavljajući rotaciono kretanje i vode formiraju "peščane gomile" sa visokom potencijalnom energijom (*Zhou i sar.*, 1999).

#### **2.7.3.7. Nasipna gustina**

Nasipna gustina je ( $\rho_b$ ) je odnos mase i zapremine koju zauzima uzorak čestica uključujući i međuprostore između čestica (*Hoseney i Faubion*, 1992; *Gupta i Das*, 1997). Razni standardni načini određivanja nasipne gustine su u primeni, u zavisnosti od standardne posude, načina sipanja, usipne visine, itd.

#### **2.7.3.8. Ugao mirovanja mase čestica**

Ugao mirovanja ( $a$ ) je definisan kao maksimalni ugao ravni u odnosu na horizontalu na kojoj se gomila granularnog materijala ne kreće (*Mohsenin*, 1986; *Hoseney i Faubion*, 1992). Ugao mirovanja granula je određen mnogobrojnim faktorima, kao što su sile trenja generisane međusobnim kretanjem granula, rasporedom mase granula i sadržajem vlage mase granula (*Hoseney i Faubion*, 1992). Definišu se najmanje dva ugla mirovanja: Statičku ugao



mirovanja i dinamički ugao mirovanja. Dinamički ugao mirovanja je generalno manji od statičkog, najmanje 3-10° (*Fowler i Wyatt, 1960*).

Smatra se da su ugao mirovanja i ugao unutrašnjeg trenja (između čestica) približno jednaki (*Mohsenin, 1986; Walton, 1994*); *Fowler i Chodziesner (1959)* što proizilazi iz empirijske jednačine za određivanje ugla trenja primenjujući metod nagibne kutije. *Fowler i Wyatt (1960)* koriste istu formu da definišu koeficijent ugla mirovanja. *Fowler i Chodziesner-ova (1959)* jednačina je data izrazom:

$$\mu = \tan \theta = a \cdot n_f^2 + b \cdot \sqrt{\frac{\varepsilon}{D_{avg}}} - c \cdot S + d \quad (2.12)$$

gde je:  $\mu$ , koeficijent ugla trenja,  $a$ , je ugao trenja,  $n_f$  je specifična površina čvrstog tela u odnosu na loptu.  $\varepsilon$  je hrapavost špvršine po kojoj klizaju granule,  $D_{avg}$  je prosečni prečnik čestica (granula)  $S$  je gustina granuliranog materijala i  $a, b, c$  i  $d$  su konstante.

Izraz:  $\sqrt{\frac{\varepsilon}{D_{avg}}}$ , je zamenjen izrazom:  $\frac{M}{D_{avg}}$ , (*Fowler i Wyatt, 1960*), a da bi definisali

koeficijent ugla mirovanja, gde je sa  $M$ , dodat sadržaj vlage u granulama. *Fowler i*

*Chodziesner (1959)* primetili su da je izraz:  $\frac{S}{D_{avg}}$ , takođe zvan, "faktor relativne hrapavosti"

jedinstven (materijal kliza po samom sebi – granule po granulama.), to jest da je ugao mirovanja jednak uglu trenja i da je nezavisan od prečnika granuliranog materijala. Isto važi i

kada je:  $\frac{S}{D_{avg}} = 0$  (glatka površina). *Stewart (1968)*, je pokazao da bar u jednom slučaju ugao

mirovanja različit od unutrašnjeg trenja.

#### 2.7.4. DEM numerički model

DEM metoda koristi pristup soft-sphere (mekane čestice) koji su razvili *Cundall i Strack 1979*. U ovoj metodi, česticama koje su u kontaktu je dozvoljeno da imaju male deformacije i ove deformacije se koriste za računanje sila koje deluju između čestica kao što je to prikazano na opštem numeričkom algoritmu kao što je prikazano na slici 2.3 (*Kuo, 2001*).

Numerički algoritam za DEM analizu u opštem slučaju počinje postavljanjem početnih uslova. Da bi se izračunala kontaktna sila u proračunu se traže kontaktna mesta

čestica da bi se odredio kontakt preklapanja između svake pojedinačne čestice. Određivanje kontakta je vremenski najzahtevniji zadatak, kao i računarski najduža operacija. Kada je jednom određen kontakt (preklapanje između čestica određuje se ukupna sila koja deluje na svaku česticu, a translaciono i rotaciono kretanje se opisuje integraljenjem Njutnove jednačine kretanja (jednačine 2.13 i jednačine 2.14).

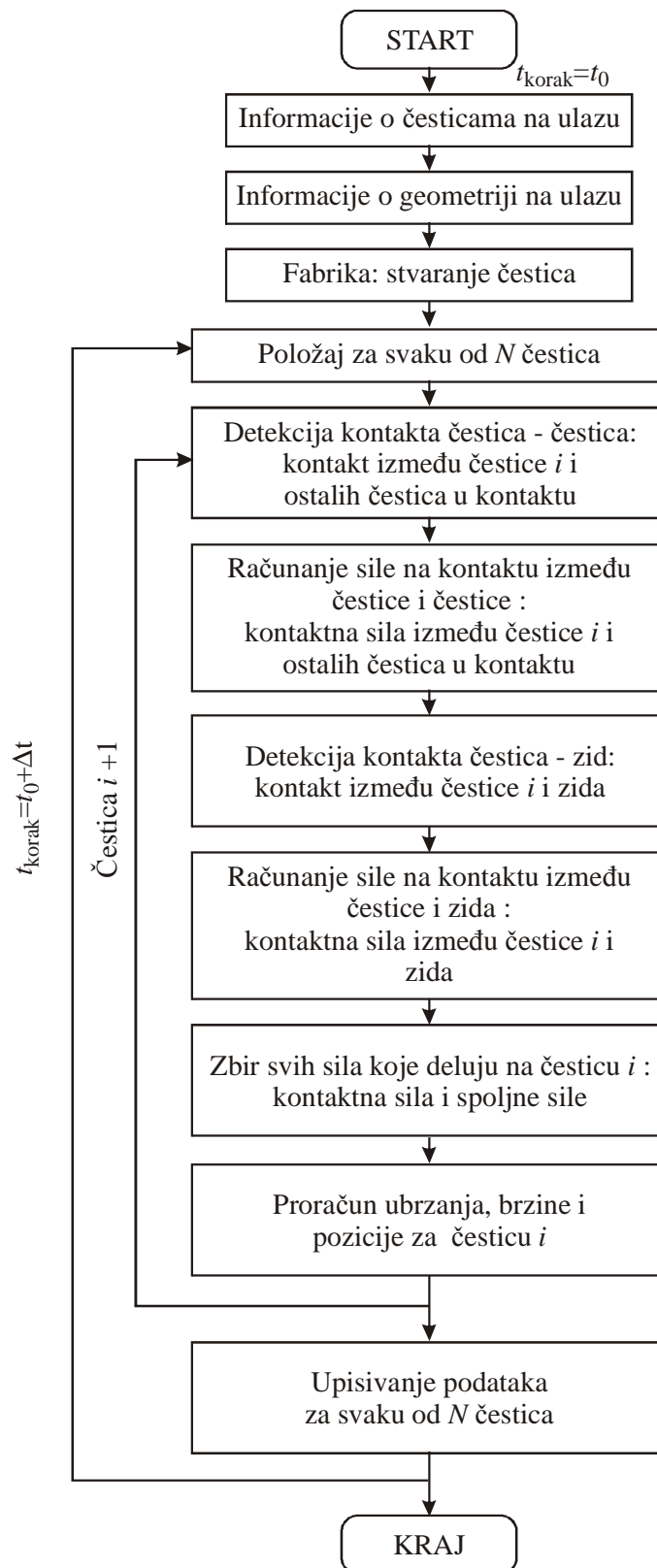
Računanje se vrši u diskretnim vremenskim koracima. Između svakog vremenskog koraka čestice se kreću po pravoj liniji na osnovu izračunatih vrednosti brzine i ubrzanja u tom vremenskom koraku. Ove trajektorije se koriste da bi se izračunale pozicije (prostorne koordinate) čestica u sledećem vremenskom koraku. Preklapanja čestica tj. kontakti se koriste da bi se izračunale sile koje deluju na svaku česticu, čime se određuju njihove brzine i ubrzanja za svaku česticu u sledećem diskretnom vremenskom koraku. Sila i moment koji deluju na česticu predstavljaju zbir svih sila i momenata koji deluju na česticu što uključuje gravitacionu silu i potisnu silu fluida.

U ovom radu se razmatraju sile i momenti koje izazivaju gravitaciona sila, kontaktno trenje i trenje kotrljanja, a Njutnove jednačine kretanja za česticu  $i$  koja je u kontaktu sa česticom  $j$  ima sledeći oblik:

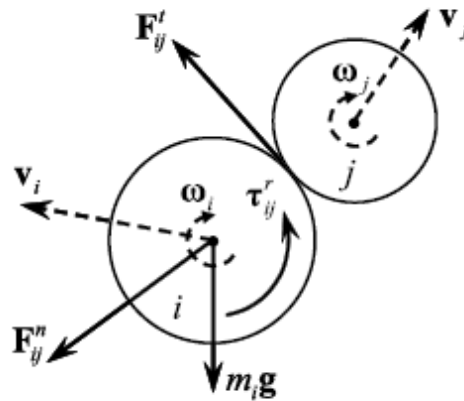
$$m_i \frac{dv_i}{dt} = \sum (F_{ij}^n + F_{ij}^t) + m_i g \quad (2.13)$$

$$I_i \frac{d\omega_i}{dt} = \sum (R_i \times F_{ij}^t - \tau_{ij}^r) \quad (2.14)$$

gde su:  $m_i$ ,  $I_i$ ,  $v_i$ ,  $\omega_i$  respektivno: masa, moment inercije, brzina translacije i brzina rotacije čestice  $i$ .  $F_{ij}^n$  i  $F_{ij}^t$  su normalna i tangencijalna sila koje se javljaju usled kontakta između čestice  $i$  i  $j$  u trenutnom vremenskom koraku kao što je prikazano na slici 2.14,  $R_i$  je vektor koji polazi iz centra čestice  $i$  i usmeren je u pravcu kome deluje sila  $F_{ij}^t$ .



Slika. 2.13 Numerički algoritam za DEM analizu (Kuo, 2001)



Slika 2.14 Kontakt između čestica  $i$  i  $j$  (Remy i sar. 2009; Marigo, 2012)

Član  $\tau_{ij}^r = -\mu_r R_i |F_{ij}^n| \hat{\omega}_i$  u jednačini 2.14 se dodaje na osnovu momenta koji se javlja od trenja kotrljanja. Parametar  $\mu_r$  se definiše kao koeficijent kotrljanja a  $\hat{\omega}_i$  je jedinična ugaona brzina čestice  $i$ . Gubici usled trenja kotrljanja se mogu javiti na primer usled formiranja ili razbijanja veza na površinama kao što su tečni ili elektrostatički svodovi, histerezis koji se javlja pri deformaciji pokretne tačke kontakta, preklapanje kontaktnih površina (Tabor, 1955; Johnson, 1972; Zhou, 1999; Yang, 2003).

Teško je odrediti tačnu vrednost koeficijenta trenja za granularne materijale ukoliko se ne razume u opštem smislu priroda trenja kotrljanja. Na slici 2.14 su prikazane sledeće oznake:

$R_i$  - poluprečnik čestice  $i$

$R_j$  - poluprečnik čestice  $j$

$r_i$  - pozicija čestice  $i$  (koordinate centra čestice)

$r_j$  - pozicija čestice  $j$  (koordinate centra čestice)

$v_i$  - brzina čestice  $i$

$v_j$  - brzina čestice  $j$

Dve čestice su u kontaktu ako važi sledeća relacija:

$$|r_i - r_j| \leq R_i + R_j \quad (2.15)$$

normalni jedinični vektor koji spaja centre dve čestice se definiše kao:

$$n_{ij} = \frac{r_j - r_i}{\|r_j - r_i\|} \quad (2.16)$$

relavna brzina se definiše kao:

$$v_{ij} = v_i - v_j \quad (2.17)$$

Na osnovu ovoga relativna brzina u normalnom pravcu se računa kao:

$$v_{ij}^n = (v_{ij} \cdot n_{ij}) n_{ij} \quad (2.18)$$

Relativna brzina u tangencijalnom pravcu se računa kao:

$$v_{ij}^t = v_{ij} - v_{ij}^n \quad (2.19)$$

Jedinični vektor u tangencijalnom pravcu se računa kao:

$$\hat{t}_{ij} = \frac{v_{ij} - v_{ij}^n}{\|v_{ij} - v_{ij}^n\|} \quad (2.20)$$

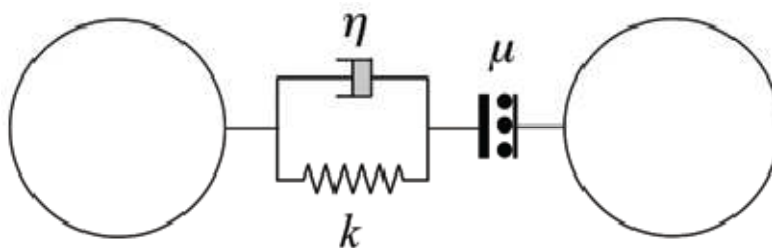
Za model je neophodno da se izračunaju komponente sila koje deluju između čestica, kao i one sile koje deluju između čestica i krutih tela (npr. graničnih površina) kada dođe do kontakta između njih. U literaturi (*Kruggel-Emden*, 2010; *Di Renzo*, 2004, 2005; *Mishra*, 2003; *Bertrand*, 2005; *Oda*, 1999) je navedeno više kontaktnih modela koji opisuju ove pojave. Nema opšteg konsenzusa o tome koji je kontaktni model najbolji pošto ovi modeli nisu ekvivalentni i razmatraju kontakte čestica i zidova na različite načine.

Na primer modeli koji se baziraju na Hertzovoj teoriji posmatraju čestice kod kojih se događaju elastične deformacije, dok modeli elastičnih čestica razmatraju čestice kod kojih se dešavaju viskozno-elastične deformacije (*Bertrand*, 2005). Svi ovi modeli se zasnivaju na sličnim parametrima čije vrednosti se moraju definisati pre postavljanja modela. Veoma je važno da se izvrši eksperimentalna validacija svakog modela koji je zasnovan na DEM analizi pre njegove primene. Pažljiva strategija za validaciju uvek bi trebalo da obuhvati završni test poređenja numeričkih i eksperimentalnih rezultata.

Kontaktni model koji su razvili *Cundall i Struck*, 1979, je zasnovan na modelu Kelvin-Voigt koji je prikazan na slici 2.15.

Opruga, prigušivač i klizač predstavljaju kontaktni model u normalnom i tangencijalnom pravcu. Ovaj model podrazumeva da su definisani sledeći parametri u normalnom i tangencijalnom pravcu:

- koeficijent elastičnosti opruge  $k$
- koeficijent prigušenja  $\eta$
- koeficijent trenja  $\mu$



Slika 2.15 Kelvin-Voigt kontaktni model (Tsuji i sar. 1997; Marigo, 2012)

Cundall i Strack, 1979, su definisali jednačinu 2.21 za kontakt u normalnom pravcu:

$$F_{ij}^n = (-k_n \delta_{ij}^n - \eta_n v_{ij}^n) \quad (2.21)$$

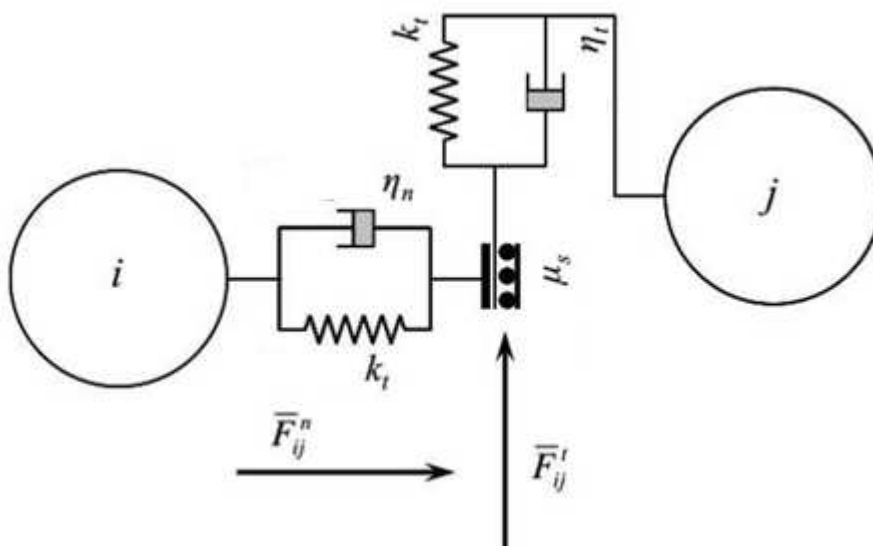
i jednačinu 2.22 za kontaktnu silu u tangencijalnom pravcu:

$$F_{ij}^t = (-k_n \delta_{ij}^t - \eta_n v_{ij}^s) \quad (2.22)$$

Koeficijent elastičnosti u normalnom i tangencijalnom pravcu ( $k_n, k_t$ ), koeficijenti prigušenja ( $\eta_n, \eta_t$ ), i koeficijent trenja  $\mu_s$  se definišu u simulaciji.  $\delta_{ij}^n$  i  $\delta_{ij}^t$  su pomeranja čestice u normalnom i tangencijalnom pravcu usled delovanja i tangencijalne sile.  $v_{ij}^s$  je brzina klizanja na kontaktnoj površini koja se definiše kao:

$$v_{ij}^s = v_{ij} - (v_{ij} \cdot n_{ij})n + (R_i \omega_i + R_j \omega_j) \times n_{ij} \quad (2.23)$$

Tsuji i sar. 1997 su predložili sledeću šemu:



Slika 2.16 Modifikovani Hertz-Mindlin kontaktni model

U ovom modelu prvi član jednačine 2.21 je zamenjen nelinearnim članom koji razmatra Hercova teorija normalnog kontakta. Tangencijalni kontaktni model koji je predložio *Tsuiji*, 1993, je opisan modifikovanom jednačinom 2.21 koja uvodi član disipacije viskoznosti jednačina 2.24. Tako se ovaj model može predstaviti u sledećoj formi:

$$F_{ij}^n = \left( -k_n \delta_{ij}^{n^{\frac{3}{2}}} - \eta_n (v_{ij}^n \cdot n_{ij}) \cdot n_{ij} \right) \quad (2.24)$$

$$F_{ij}^t = \left( -k_t \delta_{ij}^t - \eta_t \cdot v_{ij}^t \right) \quad (2.25)$$

gde je  $v_{ij}^s$  brzina klizanja zamenjena sa relativnom tangencijalnom brzinom  $v_{ij}^t$  dovoljno velika tangencijalna sila će dovesti do toga da čestice klize relativno u odnosu jedna na drugu ili u odnosu na graničnu površinu sa kojom su u dodiru. Razmatrane čestice koje nisu u dodiru koje nemaju kohezionu silu su izložene stalnoj normalnoj sili: dodatno klizanje pod uticaj tangencijalne sile je određeno izrazom:

$$|F_{ij}^t| < \mu_s |F_{ij}^n| \quad (2.26)$$

### 3.MATERIJAL I METODE

#### 3.1. Materijal

##### 3.1.1. Granulisani zeolit

Uslovi i parametri za modelovanje procesa koji su definisani za DEM simulaciju, koji su navedeni u tabeli 3.1, vezano za granulisani zeolit važe i za fizičke parametre materijala (granulisanog zeolita) koji je korišćen u eksperimentima.

##### 3.1.2. Kukuruzna prekrupa

Ispitivanje homogenosti mešavine je urađeno korišćenjem sledećih materijala:

-granulisani zeolit sfernog oblika, sa karakteristikama granule predstavljenim u Tab. 3.1. u daljem tekstu.

-samleveni kukuruz kao nosač, sa granulometrijskim profilom, koji je dobijen mlevenjem na mlinu čekićaru sa sitom, čiji su otvori na cilindričnom situ Ø 3 mm. Količina šarže je bila 15 kg.

Ispitivanje je obavljeno na statičkoj mešalici tipa Komax sa tri elementa pri jednom, tri i pet prolaza kroz sklop mešalice. Uzorci se uzimaju posle svakog od navedenih prolaza i to po deset komada približne mase od 100 gr.

Sledeći parametri materijala potrebni za analizu su dobijene eksperimentalnim metodama u skladu sa odgovarajućim standardima:

- 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.
- Vlažnost materijala je po standardnoj metodi za određivanje sadržaja vlage, sušenjem na 105°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.

Granulacioni sastav kukuruzne prekrupe usitnjene na mlinu čekićaru određen je analizom sejanja po metodi ASAE standard S319.3 (ASAE, 2003). Analiza sejanja urađena je pomoću sito tresilice Endecotts minor (London, Velika Britanija), pri čemu su korišćena sita sa veličinom otvora 3150, 2500, 2000, 1600, 1000, 630, 250, 125 i 63  $\mu\text{m}$ . Prosejavanje svakog uzorka rađeno je u tri ponavljanja pri čemu je masa uzorka iznosila oko 100 g.

Nakon prosejavanja merena je masa materijala na svakom situ i na dnu i tako dobijena raspodela veličine čestica. Geometrijski srednji prečnik (GSP) i geometrijska standardna devijacija (GSD) izračunati su prema sledećim jednačinama (Pfof and Headley, 1976):

$$GSP(\mu\text{m}) = \log^{-1} \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (W_i \cdot \log d'_i)}{\sum_{i=1}^n W_i} \right] \quad (2.27)$$

$$d'_i(\mu\text{m}) = \sqrt{d_i \cdot d_{i+1}} \quad (2.28)$$

$$GSD(\mu\text{m}) = \log^{-1} \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (\log d'_i - \log GMD)}{\sum_{i=1}^n W_i} \right] \quad (2.29)$$

gde je:

$d_i$  – prečnik otvora i-tog sita

$d'_i$  – geometrijski srednji prečnik čestica na i-tom situ

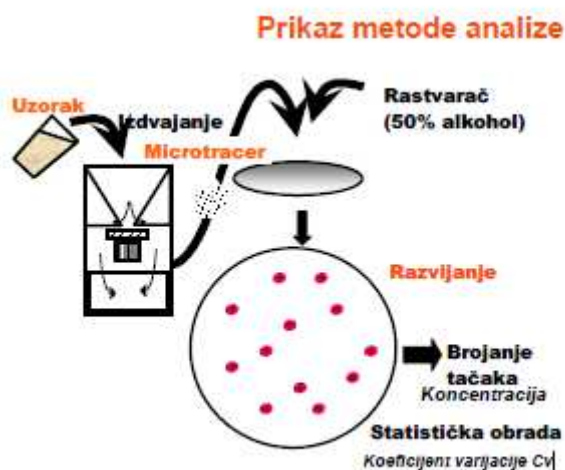
$W_i$  – masa materijala na i-tom situ

### 3.2 Metoda za određivanje homogenosti sa Microtracer-ima

Homogenost mešavine je merena metodom Microtracer-a za različite odnose mešanja kukuruzne prekrupe i microtracer-a (1:10.000 i 1:100.000), a kvantitativno je izražena preko verovatnoće P (engl. probability) i relativne standardne devijacije (RSD). 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, Đuragić, 2011.

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 zagrejanjoj 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 3.1) , Đuragić, 2011.

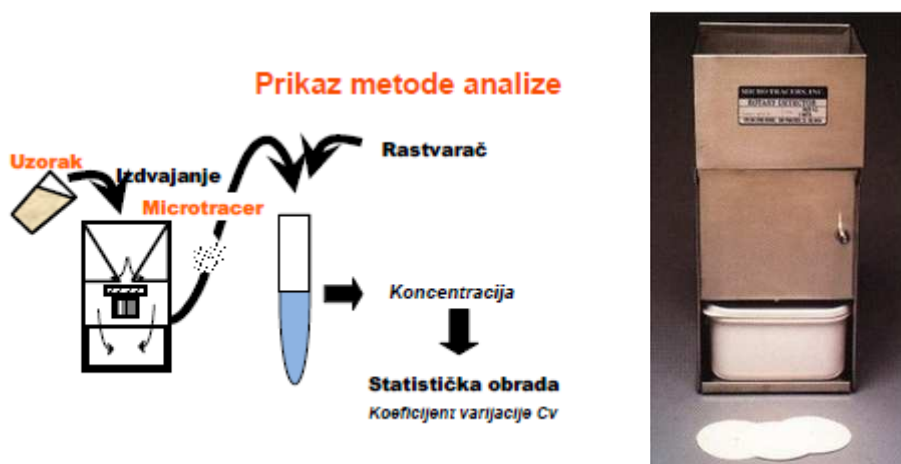


Slika 3.1. Prikaz metode Microtracer® sa brojanjem tačkica, Đuragić, 2011.

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 uzoraka je isti kao i kod brojanja tačkica (na Rotary detektoru) ali se boja sa izdvojenih čestica, rastvara u rastvaraču (u ovom slučaju 7%  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) i očitava na spektrofotometru. Talasna dužina na kojoj su očitane vrednosti absorpcije 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 3.2), Đuragić, 2011.



Slika 3.2. Prikaz metode Microtracer® sa spektrofotometrijskim određivanjem koncentracije

Izračunavanje vrednosti iz matematičkog modela je urađeno u programu Excel 2007, a rezultati su upoređeni i statistički obrađeni pomoću programa STATISTICA V 9.0 (Statistica, 2009).

### 3.3 Metoda za određivanje homogenosti obradom fotografije uzorka

U toku eksperimentalnog rada za ispitivanje umešanosti granulisanog zeolita (crvene i plave boje), snimane su slike u boji, korišćenjem kamere Sony PowerShot A550, digitalnog fotoaparata za kućnu upotrebu. Sve snimljene fotografije su bile 24 bit-ne RGB (16,8 miliona boja) u formatu digitalne rezolucije  $1024 \times 768$ . Pri snimanju je korišćena "Macro" funkcija digitalnog fotoaparata, da bi se pokrila površina scene od  $\varnothing 60$  mm. Prilikom snimanja fotoaparatom, uzorci izmešanih materijala su postavljeni u komoru za snimanje, na belu papirnu salvetu, 15 cm ispod okulara digitalnog fotoaparata. Salvete su korišćene kako bi se izbegli neželjene efekti refleksije od zidova komore. Sa ovakvom pripremom, bilo je moguće da se snimanje slika vrši u uslovima zanemarljivog osenčenja i bez svetlosnih refleksija.

Nakon izvršenih snimanja, dobijene slike se prebacuju na personalni računar u formi jpeg komprimovanih datoteka digitalnih slika. Potrebna količina memorije uveznih JPEG slike bila je u rasponu od 900 do 1250 KB. Praćenje zastupljenosti plavih i crvenih površina

za svaku dobijenu sliku je vršeno korišćenjem originalno razvijenog računarskog programa. Podaci svake slike su prevedeni u trodimenzionalni niz brojeva, R (crveno), G (zeleno) i B (plave), u rasponu od 0-255. Ovi podaci su obrađivani kako bi se pronašla boja posmatranih tačaka (piksela) i da se R, G i B vrednosti tih piksela prevedu na najbliže vrednosti čistih boja (tj. crvene ili plave).

Praćenjem broja piksela obojenih u crvenu i plavu boju na definisanim delovima fotografijama obrađenim na ovaj, bilo je moguće odrediti stepen izmešanosti granulastog materijala. U tu svrhu fotografije su deljene na četvrtine, a kao kriterijum za izmešanost materijala je korišćena relativna standardna devijacija (RSD).

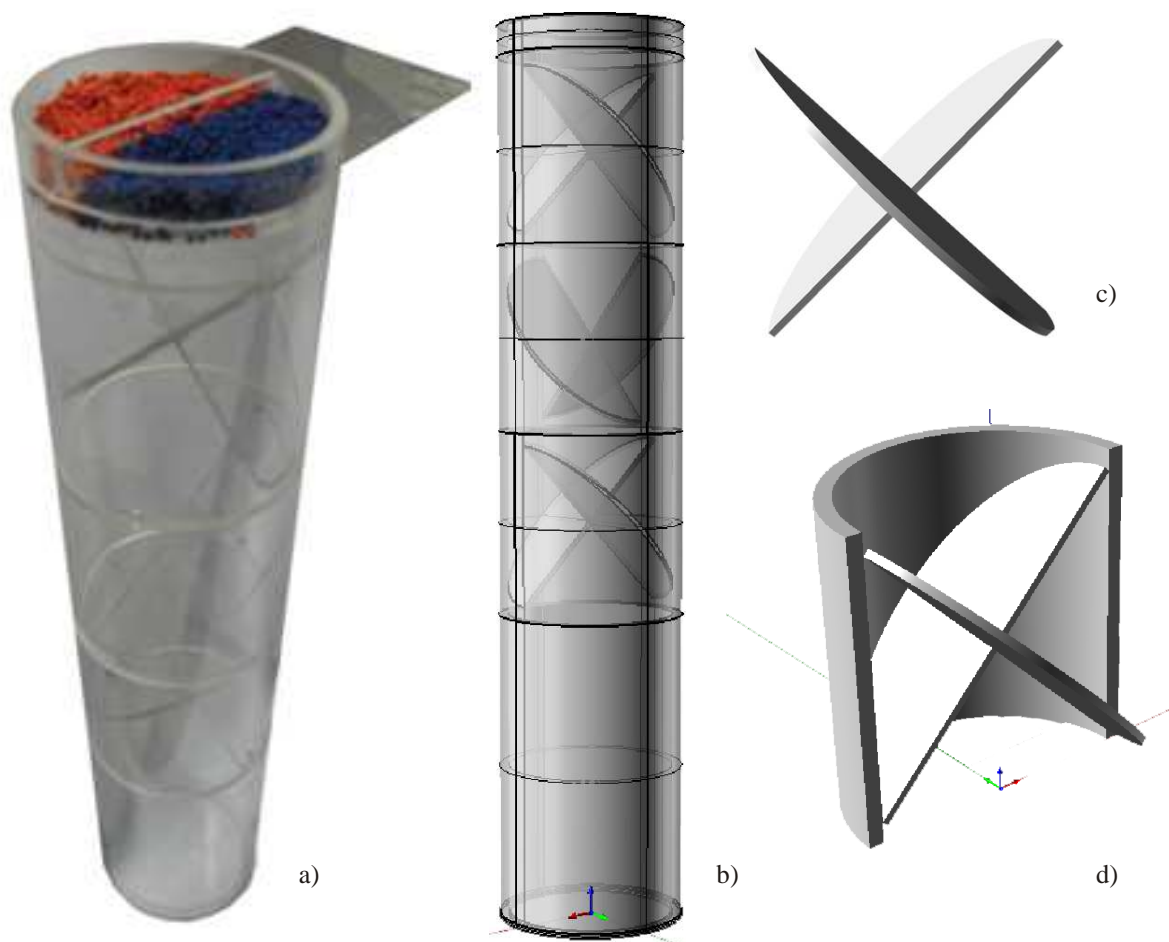
### **3.4. Statičke mešalice**

Kod statičkih mešalica, granulisani ili praškasti materijal se transportuje kroz cev u kojoj se nalaze stacionarne lopatice. Ova tehnika mešanja se koristi pri laminarnom protoku, pa su padovi pritiska tokom transporta mali. Za ispitivanje mešavina granulastog materijala (granule zeolita) su korišćene statičke mešalice sa dva tipa elemenata za mešanje: mešalice Komax ili Ross, povezanih u seriji od 1, 2 ili 3 komada, sa ili bez segmenta za smirivanje protoka na izlazu. Takođe su vršeni eksperimenti mešanja kukuruzne prekrupe samlevene na mlinu čekićaru (otvor sita od 3 mm) na rotacionom statičkom mikseru tipa Komax, sa 3 elementa za mešanje. Vršeno je poređenje performansi procesa mešanja praćenjem putanju suspendovanih čestica kroz mešalicu.

#### **3.4.1 Statičke mešalice tipa Ross**

Na (slici 3.3.) prikazana je statička mešalica tipa Ross, 3d računarski model mešalice za formiranje numeričkog modela, 3d računarski model elementa za mešanje tipa Ross i fotografija statičke mešalice sa tri segmenta koja je korišćena u eksperimentu. Eksperimentalna mešalica tipa Ross napravljena je od transparentnog pleksiglasa. Cev (spoljni omotač) je napravljen od pleksiglas cevi debljine 3 mm. Elementi za mešanje napravljeni su od pločastog pleksiglasa, debljine 1,5 mm. Segmenti su pre sečenja modelovani na računaru u izabranom CAD paketu iz koga je eksportovana DWG datoteka. Ova datoteka je uvezena u CAM program iz koga je generisan G-kod za upravljanje CNC glodalicom. Na CNC glodalici napravljeni su elementi segmenta za mešanje, tipa Ross,

direktnim sečenjem. Elementi segmenta za mešanje i cev dužine 60 mm spojeni su korišćenjem lepka Bisson za plastične materijale. Mešalica je napravljena od providnog pleksiglasa da bi se vizuelno mogao pratiti proces mešanja granula zeolita različitih boja. Isti 3d geometrijski modeli nacrtan u CAD programu za potrebe izrade konstrukcije za eksperiment, prenesen je kao IGES datoteka u programski paket za DEM analizu.



Slika 3.3. a) Fotografija statičke mešalice sa tri segmenta Ross, koja je korišćena u eksperimentu, b) Statička mešalica tipa Ross sa tri statička elementa (3d računarski model), c) element tipa Ross korišćen u modelu, d) Segment statičke mešalice tipa Ross u sklopu - poprečni presek

Tehničke karakteristike statičke mešalice tip Ross koja je korišćena pri eksperimentalnom ispitivanju su sledeće: cevni segment, slika 3.3 je izrađen od pleksiglas cevi spoljnog prečnika  $\varnothing 60$  mm, debljina cevi:  $\delta = 3$  mm, visina segmenta cevi:  $h = 60$  mm. Debljina pleksiglasa od kojeg je izrađen element za mešanje tipa Ross je bila 1,5 mm.

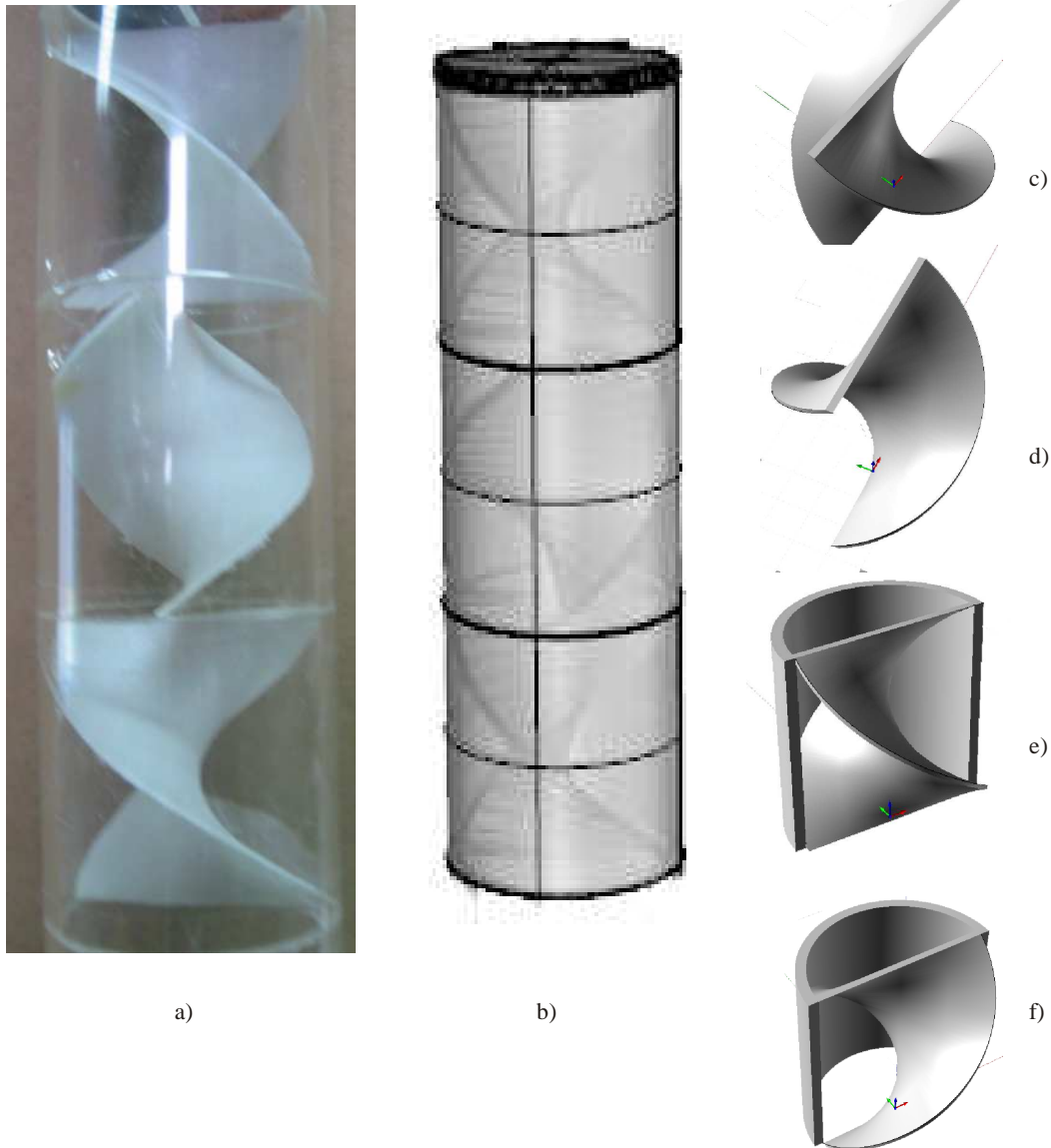
Za potrebe eksperimenta, a u cilju optimizacije procesa mešanja napravljeno je deset segmenata statičke mešalice tipa Ross, koji se po potrebi međusobno povezuju, tako što se svaki sledeći segment rotira u odnosu na predhodni za 90°. Treba takođe napomenuti da je svaki sledeći segment prostorno suprotno orjentisan, te se kolona slaže naizmenično „levi”pa „desni” i još se isti prostorno zakreću za 90°.

### **3.4.2. Statičke mešalice tipa Komax**

Na (slici 3.4.) prikazana je statička mešalice tipa Komax, 3d računarski model mešalice za formiranje numeričkog modela, 3d računarski model elementa za mešanje tipa Komax i fotografija statičke mešalice sa tri segmenta koja je korišćena u eksperimentu. Cev (spoljni omotač) je napravljen od pleksiglas cevi debljine 3 mm. Elementi za mešanje napravljeni su od PVC plastike, debljine 1,5 mm. Segmenti su modelovani na računaru u izabranom CAD paketu iz koga je eksportovana DWG datoteka. 3d geometrijski modeli nacrtan u CAD programu za potrebe izrade konstrukcije za eksperiment, prenesen je kao IGES datoteka (za desnovojni i levovojni segment elementa za mešanje). IGES datoteka je iskorišćena za 3d štampu i izradu elemenata za mešanje od PVC plastike. Elementii segmenta za mešanje i cev dužine 60 mm spojeni su korišćenjem lepka Bisson za plastične materijale. Spoljni omotač mešalice je napravljena od providnog pleksiglasa da bi se vizuelno mogao pratiti proces mešanja granula zeolita različitih boja. Isti 3d geometrijski modeli nacrtan u CAD programu za potrebe izrade konstrukcije za eksperiment, prenesen je kao IGES datoteka u programski paket za DEM analizu.

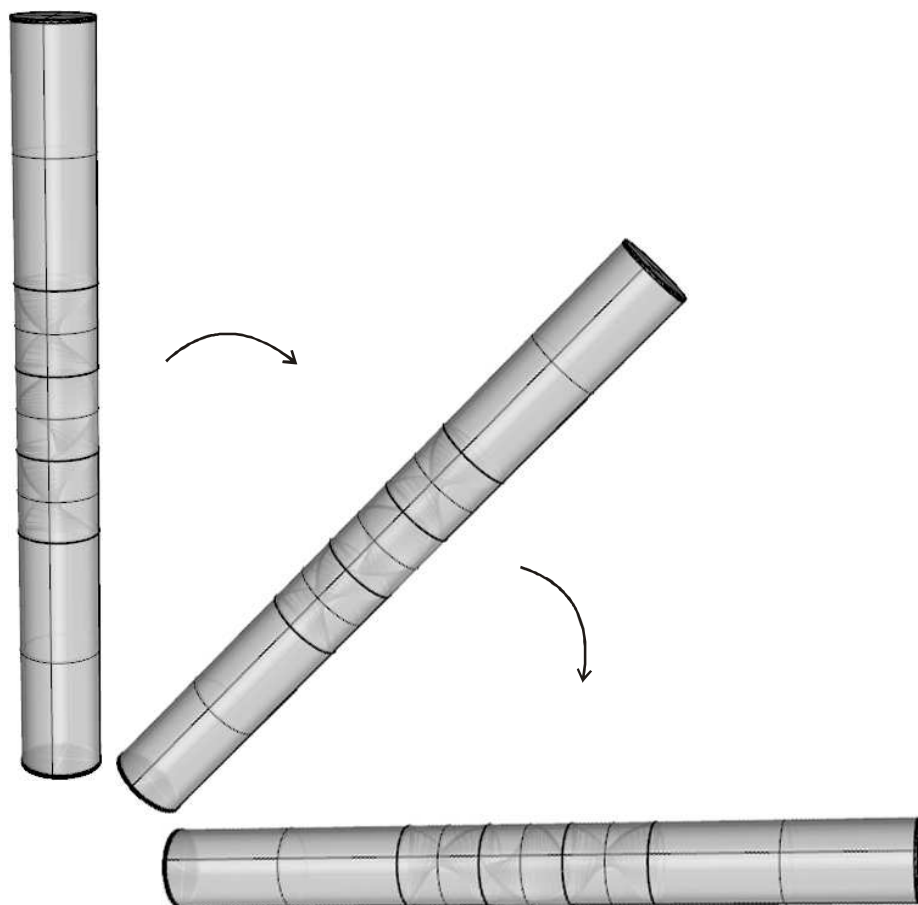
Tehničke karakteristike statičke mešalice tip Komax koja je korišćena pri eksperimentalnom ispitivanju su sledeće: cevni segment, slika 3.2 je izrađen od pleksiglasa cevi spoljnog prečnika  $\varnothing 60$  mm, debljina cevi:  $\delta = 3$  mm, visina segmenta cevi:  $h = 60$  mm. Segment je urađen korišćenjem 3d štampača, od PVC plastikedebljina.

Za potrebe eksperimenta, a u cilju optimizacije procesa mešanja napravljeno je tri segmenata statičke mešalice tipa Komax, koji se po potrebi međusobno povezuju, tako što se svaki sledeći segment rotira u odnosu na predhodni za 90°. Treba takođe napomenuti da je svaki sledeći segment prostorno suprotno orjentisan, te se kolona slaže naizmenično „levi”pa „desni” i još se isti prostorno zakreću za 90°.



Slika 3.4. a) Fotografija statičke mešalice tipa Komax, sa tri segmenta koja je korišćena u eksperimentu, b) Statička mešalice tipa Komax sa tri statička elementa (3d računarski model), c) desnovojni element tipa Komax (3d računarski model), d) levovojni element tipa Komax (3d računarski model), e, f) Elementi statičke mešalice tipa Komax u sklopu cevi-presek (3d računarski modeli)

### 3.4.3. Statička rotaciona mešalica tipa Komax



Slika 3.5 Obrtanje statičkog miksera

Statička rotaciona mešalica tipa Komax je napravljena od 3 elementa za mešanje (2 desnovojna i jedan levovojni Komax segment). Segmenti su napravljeni od bele PVC plastike debljine 1,5 mm, metodom brze izrade prototipa (engl. rapid prototyping). Oklop segmenta mešalice napravljen je od providnog pleksiglasa debljine 3 mm. Dužina jednog segmenta iznosi 60 mm, a spoljašnji prečnik je  $\text{Ø}60$  mm. Segmenti su spojeni tako da izlaz iz prvog desnovojnog se spaja pod  $90^\circ$  sa narednim levovojnim segmentom. Na ovaj način, nadolazeći tok materijala se deli na dva dela pri ulasku u drugi segment. Isto važi i za sledeći segment. Na ulazu i izlazu statičke rotacione mešalice nalaze se komore za prihvat materijala pre i posle mešanja. Napravljene su od istog materijala kao i oklop statičke rotacione mešalice. Visina ovih komora je 240 mm. Nakon prolaska materijala kroz 3 segmenta statičke mešalice, granulasti materijal se nalazi u donjoj komori za prihvat. Potom se celokupna mešalica obrće za  $180^\circ$ . U tom trenutku materijal iz gornje komore protiče kroz statičku



mešalicu, pod uticajem zemljine teže i tako izmešan biva prihvaćen u donjoj komori. Okretanje mešalice se vrši ručno željeni broj puta.

### **3.5. Cilindrična mešalica**

Cilindrična mešalica je korišćena za izvođenje eksperimenata mešanja kukuruzne prekrupe samlevene u mlinu čekićaru sa sitom otvora 3 mm i microtracer-a u odnosu 1:10000. Drugi eksperiment je izveden sa materijalom istih karakteristika, koji je prethodno prošao kroz statičku mešalicu tipa Komax, sa tri elementa za mešanje, sa 5 prolaza. U eksperimentu je korišćena ista Komax mešalica koja je korišćena za granulasti materijal (granule zeolita).

U laboratorijskim uslovima ispitivana je efikasnost mešanja cilindrične mešalice za aditive (model SYTH0.25, Jiangsu Muyang Group Co. Ltd., Kina, slika 3.6) za sledeća vremena mešanja: 30, 90 i 150 sekundi (uzimano je po 10 uzoraka iz šarže sa različitih mesta za uzimanje uzoraka za ova vremena) . Veličina šarže je 15 kg. Vremena mešanja su skraćena na polovinu u drugom eksperimentu na 15, 45 i 75 sekundi (kada je pre mešanja u rotacionoj mešalici, materijal prethodno izmešan u statičkoj mešalici).

Osnovne tehničke karakteristike ove mešalice su: brzina rotacije je 21 obrtaj u minutu, vreme zadržavanja materijala u mešalici je 8-15 minuta,  $RSD \leq 5\%$ , snaga motora mešalice 0,55 kW, težina mešalice 136 kg.

Za simulaciju granulometrijskog sastava aditiva korišćeno je kukuruzno stočno brašno (nosač). Granulometrijski sastav kukuruznog stočnog brašna određen je na laboratorijskom situ (model Minor, Endecotts Ltd., Velika Britanija).

Homogenost je određivana metodom sa „Mikrotrejserima“. Korišćen je „Mikrotrejser“ RF (RF-blue) grupe. Koncentracija je određena iz odnosa mešanja 1:10.000, i u ovom slučaju iznosi 1,5 gr.

Iz uzoraka koji se analiziraju, prethodno umešane čestice „mikrotrejsera“ se izdvajaju pomoću magnetnog separatora (model Rotary detector, Microtracer Inc., San Francisko). Izdvojeni „Mikrotrejseri“ grupe RF prelivani su 7%-nim rastvorom  $Na_2CO_3$ , pri čemu je njihova koncentracija određivana preko intenziteta razvijene boje merenjem ekstinkcije, na spektrofotometru (Janway Ltd., Velika Britanija).

Kod određivanja sadržaja RF obeleživača spektrofotometrijski, vrednosti koeficijenta varijacije, predstavljaju osnovni kriterijum za homogenost. Za odnos mešanja 1:10.000 i vrednosti koeficijenta varijacije do 5% smatra se da je uniformnost obeleživača dobra.

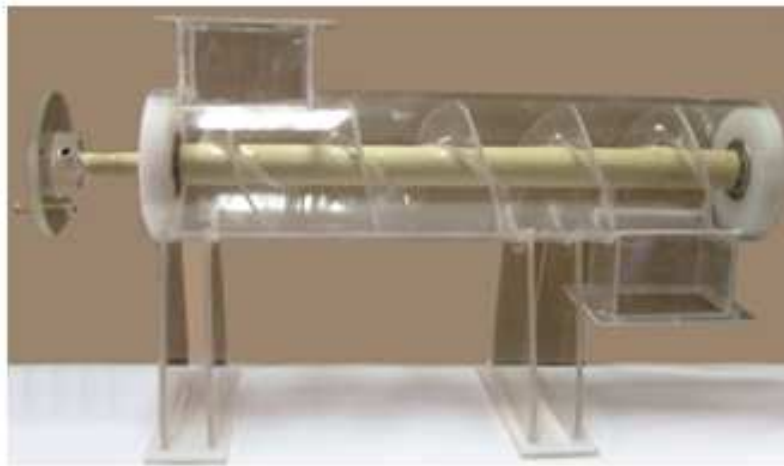


Slika 3.6. Cilindrična mešalica, model SYTH0.25

### **3.6. Pužni transporter, modifikacije i geometrijske karakteristike**

Pužni transporteri se široko koriste za transport i/ili podizanje čestica u kontrolisanim količinama, nepromenljivom brzinom. Na (slici 3.7.) prikazan je pužni transporter. Eksperimentalni pužni transporter napravljen je od transparentnog pleksiglasa. Cev (spoljni omotač) je napravljen od pleksiglas cevi debljine 3 mm. Elementi za mešanje napravljeni su od pločastog pleksiglasa, debljine 1,5 mm. Segmenti su pre sečenja modelovani na računaru u izabranom CAD paketu iz koga je eksportovana DWG datoteka. Ova datoteka je uvezena u CAM program iz koga je generisan G-kod za upravljanje CNC glodalicom. Na CNC glodalici napravljeni su elementi segmenta za mešanje, tipa Ross, direktnim sečenjem. Elementii segmenta za mešanje i cev dužine 60 mm spojeni su korišćenjem lepka Bisson za plastične

materijale. Mešalica je napravljena od providnog pleksiglasa da bi se vizuelno mogao pratiti proces mešanja granula zeolita različitih boja. Osovina puža na oba kraja je uležištena sa dva kotrljajna ležaja. Dodatni modifikovani elementi se umeću u isti model zasecanjem spirale puža i lepljenjem. Zbog ekonomičnosti izvođenja eksperimenta, napravljen je puž dužine 800 mm, na kome su se vršile modifikacije pužne spirale (dodavanjem elemenata na spiralu puža). Ovaj puž je naknadno skraćivan na 600 i 400 mm za sledeće eksperimente. Isti 3d geometrijski modeli nacrtan u CAD programu za potrebe izrade konstrukcije za eksperiment, prenesen je kao IGES datoteka u programski paket za DEM analizu.



Slika 3.7. Pužni transporter napravljen za potrebe eksperimenta dužine 400 mm

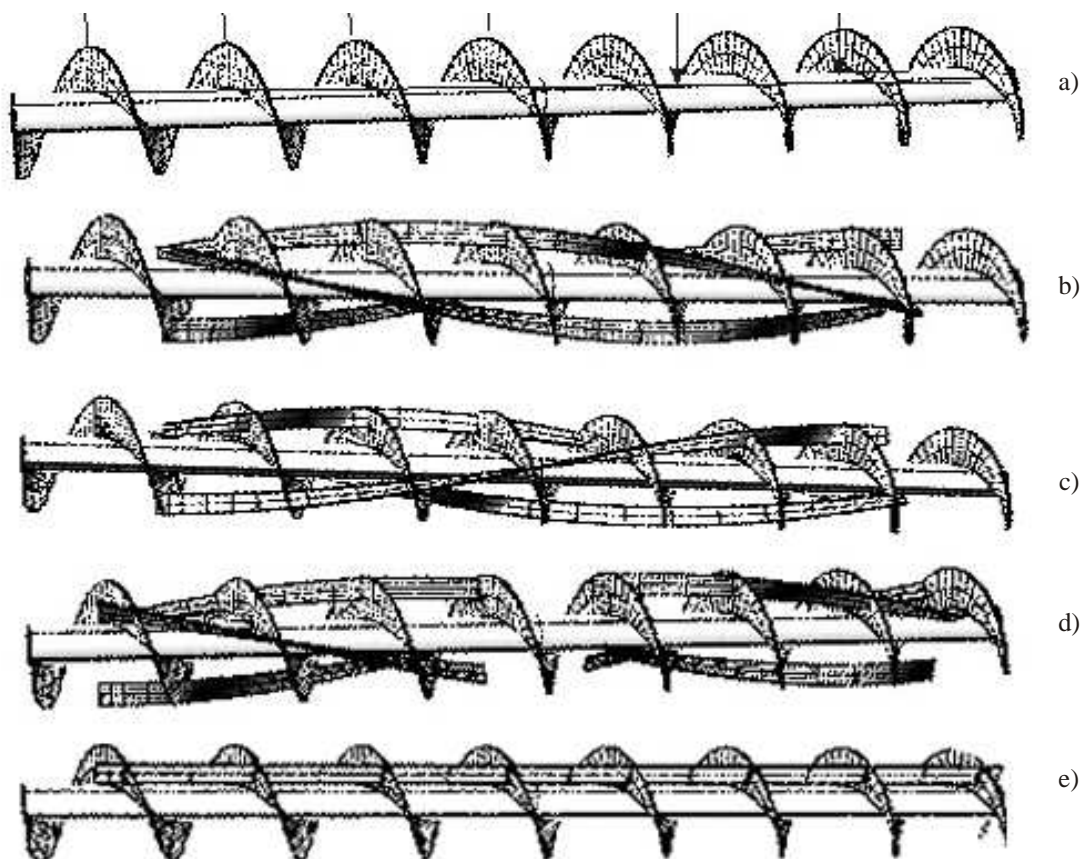
Tehničke karakteristike pužnih transportera koji su se koristili pri eksperimentalnom ispitivanju su sledeće: spoljni prečnik cevi oklopa pužnog transportera je  $\varnothing 60$  mm, debljina cevi:  $\delta = 3$  mm, prečnik vratila: 15 mm, korak spirale puža je 45 mm.

Napravljeno je ukupno petnaest izvedbi modifikovanih pužnih transportera od pleksiglasa za potrebe eksperimenta i sa njima je ispitivan kvalitet predmešanja prilikom transporta rasutih materijala. Napravljeno je pet vrsta modifikovanih pužnih transportera:

1. puž sa konstantnim korakom zavojnice (slika 3.8 a),
2. modifikovani pužni transporter sa tri dodatne zavojnice orijentisane u istom smeru kao i spirala puža (slika 3.8 b),
3. modifikovani pužni transporter sa tri dodatne zavojnice orijentisane u suprotnom smeru od spirale puža (slika 3.8 c),
4. modifikovani pužni transporter sa tri skraćene zavojnice orijentisane u suprotnom smeru od spirale puža (slika 3.8 d) i

5. modifikovani pužni transporter sa tri dodatne pravolinijske lopatice (slika 3.8 e).

Na slici 3.8 šematski su prikazane zavojnice modifikovanih pužnih transportera, koje su korišćene u eksperimentima.



Slika 3.8. Šematski prikaz modifikovanih pužnih transportera korišćenih u ovoj tezi

Svaki od ovih modifikovanih pužnih transportera testiran je po pitanju učinka mešanja u toku transporta sa tri dužine pužnice od 400, 600 ili 800 mm. Svi pužni transporter koji su korišćeni u eksperimentima su napravljeni od transparentnog pleksiglasa. Svaki eksperiment je izveden sa drugačijom konfiguracijom i različitom dužinom pužnog transportera. Gornji ulazni segment podeljen je uzdužno u smeru ose puža na dva dela, sa barijerom i pomerljivom pregradom. Obojene kuglice zeolita su usute u ove pregrade, plavo obojene u prvi, a crvene u drugi pregradak. Karakteristike granula zeolita i parametri koji su korišćeni u DEM analizi prikazani su u tabeli 3.2, a karakteristike modifikovanih puževa su prikazane u tabeli 3.3.

### 3.7. DEM i CFD simulacija procesa mešanja u statičkim mešalicama

U ovoj tezi, dato je poređenje eksperimentalnih i numeričkih podataka između različitih konfiguracija višestrukih Komax i Ross mešalica. Fluid je tretiran kao kontinuum, a čvrsta faza se modeluje korišćenjem metode diskretnih elemenata (DEM). Postavljeni model je rešen u dva dela, prvo se izračunavaju brzina i pritisak fluida, a zatim se izračunavaju putanje čestica granularnog materijala, koristeći naredni proračun. Brzina i pritisak vazduha se izračunavaju korišćenjem CFD metode (Computational Fluid Dynamics). U DEM proračunu, prate se intrakcije čestica-čestica i čestica-zid, a položaji čestica se određuju korišćenjem drugog Njutnovog zakona kretanja. Kvalitet procesa mešanja se analizira korišćenjem kriterijuma relativna standardne devijacije (RSD), *Lemieux*, 2008.

Primena DEM analize zahteva mnogo računarskog vremena da se proračun izvrši u celosti, zbog opsežnog algoritma detekcije kontakta, pri čemu se javlja pitanje ograničenja dužine koraka vremena za numeričko rešavanje interakcije čestica nakon sudara. Ipak, numeričke simulacije i matematičko modelovanje su veoma moćno sredstvo za optimizaciju. Fokus ovog rada je bio da se optimizuje geometrija i da se uporede različite statičke mešalice. Komax i Ross mešalice su komercijalni proizvodi, sa poznatom geometrijom, koji se široko koriste u raznim granama industrije. Osnovni cilj ovog istraživanja bio je da se pokaže korišćenje kombinacija DEM i CFD metoda u planiranju broja elemenata Komax ili Ross u cilju dobijanja željenih rezultata mešanja.

#### 3.7.1. DEM/CFD model za statičke mešalice

Kod statičkih mešalica, fluid se transportuje kroz cev u kojoj se nalaze stacionarne lopatice. Ova tehnika mešanja se koristi pri laminarnom protoku, pa su padovi pritiska tokom transporta mali. Ovaj rad proučava protok u dve vrste statičkih mešalica sa zavijenim spiralama, (elemenati mešalica Komax ili Ross, povezanih u seriji od 1, 2 ili 3 komada, sa ili bez segmenta za smirivanje protoka na izlazu). U ovom radu je vršeno poređenje performansi mešanja na osnovu putanje suspendovanih čestica kroz mešalicu.

Postavljeni matematički model je rešen u dve faze, u prvoj fazi je određivana brzina i pritisak vazduha, korišćenjem CFD, a zatim, u drugoj fazi se radi proračun trajektorije čestica zrnastih materijala korišćenjem DEM analize.

Korišćene su jednačine gasne faze koje se koriste za višefazne modele. Gasna faza se tretira kao idealni gas, a jednačina idealnog gasa je korišćena za modelovanje strujanja vazduha u ovom slučaju.

Jednačina održanja mase i količine kretanja za srednje vrednosti lokalnih promenljivih date su u obliku:

$$\frac{\partial(\rho_f \varepsilon)}{\partial t} + \nabla(\rho_f \varepsilon u) = 0 \quad (3.1)$$

i

$$\frac{\partial(\rho_f \varepsilon u)}{\partial t} + \nabla(\rho_f \varepsilon u \cdot u) = -\nabla p - F_{p-f} + \nabla(\varepsilon \tau) + \rho_f \varepsilon g \quad (3.2)$$

gde su  $\varepsilon$ ,  $u$ ,  $t$ ,  $\rho_f$ ,  $p$ ,  $F_{p-f}$ ,  $\tau$  i  $g$ : poroznost, srednja brzina fluida (vazduha), vreme, gustina fluida, pritisak, zapreminska sila interakcije fluida i čestice, tenzor viskoznog napona fluida, ubrzanje usled gravitacije.

Sila interakcija fluida i čestice je definisana kao:

$$F_{p-f} = \frac{1}{V_{cell}} \sum_{i=1}^{k_i} \rho_{p-f,i} \quad (3.3)$$

gde je  $F_{p-f}$  ukupna sila tečnosti na česticu  $i$ , a  $k_i$  je broj čestica u CFD ćeliji.

Kontakt između dve čestice se odigrava na malom prostoru konačne veličine, koji se pojavljuje usled deformacije čestica, što je ekvivalentno kontaktu dva kruta tela kod kojih je u DEM simulaciji proračunski dozvoljeno da se malo preklapaju (Zhu i sar, 2007). Raspodela kontaktne sile otpora preko ove oblasti može se razložiti na komponentu u kontaktnoj ravni (ili tangencijalne ravni) i komponenti normalnoj na kontaktnu ravan, tako da kontaktna sila ima dve komponente: normalnu i tangencijalnu. Teško je opisati raspodelu kontaktne sile otpora nad ovim područjem, kao i zbir sila i obrtnog momenta koji deluje na česticu, pošto oni zavise od mnogih geometrijskih i fizičkih faktora kao što su oblik, osobine materijala i stanja kretanja čestica. Alternativno, DEM analiza u načelu pojednostavljuje modelovanje jednačina pošto uvodi pojednostavljenja da bi se izračunale snage i momenti koje proističu iz kontakta između čestica. Linearni modeli su najintuitivniji i najjednostavniji modeli. Najčešće se prikazuju u formi linearnog modela sa oprugom i prigušnicom (engl. spring and dashpot) (Cundall i Strack, 1979), pri čemu se opruga koristi za predstavljanje elastičnih deformacija, dok se prigušnicom opisuju proračuni vezani za viskozne disipacije.

Čvrsta faza se tretira kao diskretna faza koju opisuje (Cundall i Strack,1979). Prema ovom modelu, translacije i rotaciona kretanja čestice u bilo kom trenutku  $t$ , mogu se opisati Njutnovim zakonom kretanja:

$$m_i \frac{dv_i}{dt} = f_{p-f,i} + \sum_{j=1}^{k_i} (f_{c,ij} + f_{d,ij}) + m_i g \quad (3.4)$$

i

$$I_i \frac{d\omega_i}{dt} = \sum_{j=1}^{k_i} (T_{ij} + M_{ij}) \quad (3.5)$$

gde su  $m_i$ ,  $I_i$ ,  $v_i$  i  $\omega_i$ : masa, moment inercije, translaciona i rotacione brzina čestice  $i$ , respektivno.

Sile koje deluju na čvrstu materiju su sila interakcije fluid-materija,  $f_{p-f,i}$ , kontaktna sila koja nastaje usled interakcije čestica  $i$  i  $j$ ,  $f_{c,ij}$ , i sila viskoznog prigušenja,  $f_{d,ij}$ , i gravitaciona sile,  $m_i g$ . Ovaj proračun je detaljno opisan u (Zhu i sar,2007).

Normalna kontaktna sila:

$$f_{cn,ij} = -\frac{E}{3(1-\nu^2)} \sqrt{2R_i} \delta_n^{3/2} n \quad (3.6)$$

Normalna sila viskoznog prigušenja:

$$f_{dn,ij} = -c_n \left( \frac{3m_i E}{\sqrt{2(1-\nu^2)} \sqrt{2R_i} \delta_n} \right)^{1/2} v_{n,ij} \quad (3.7)$$

Tangencijalna kontaktna sila:

$$f_{ct,ij} = -\frac{\mu_s f_{cn,ij}}{|\delta_t|} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{\min\{|\delta_t|, \delta_{t,max}\}}{\delta_{t,max}} \right)^{3/2} \right] \delta_t \quad (3.8)$$

Tangencijalna sila viskoznog prigušenja:

$$f_{dt,ij} = -c_t \left( 6m_i \mu_s f_{cn,ij} \frac{\sqrt{1 - \delta_t / \delta_{t,max}}}{\delta_{t,max}} \right)^{1/2} \cdot v_{t,ij} \quad (3.9)$$

$$v_{ij} = v_j - v_i + \omega_j \times R_j - \omega_i \times R_i$$

gde su:  $v_{n,ij} = (v_{ij} \cdot n) \cdot n$

$$v_{t,ij} = (v_{ij} \times n) \times n$$

Sila gravitacije tela:

$$G_i = m_i g \quad (3.10)$$

U ovom modelu, sila interakcija fluida i čvrste faze uključuje sila viskoznog trenja ( $f_{D,i}$ ) i gradijent sile pritiska ( $f_{pg,i}$ ). Zbir kontaktnih sila između  $k_i$  čestica u dodiru sa česticom  $i$  se računa kao:

$$f_{D,i} = \left( 0.63 + \frac{4.8}{\text{Re}_{p,i}^{0.5}} \right)^2 \frac{\rho_f |u_i - v_i| (u_i - v_i)}{2} \frac{\pi d_i^2}{4} \varepsilon_i^{-\beta} \quad (3.11)$$

$$\text{Re}_{p,i} = \frac{d_i \rho_f \varepsilon_i |u_i - v_i|}{\mu_f}$$

$$\beta = 3.7 - 0.65 \exp \frac{(1.5 - \log \text{Re}_{p,i})^2}{2}$$

gde je:

$$\varepsilon = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{k_c} V_i}{\Delta V_C}$$

Gradijent sile pritiska:

$$f_{pg,i} = V_{p,i} \nabla P \quad (3.12)$$

Momenti sile,  $T_{ij}$ , koje stvaraju tangencijalne sile izazvaju rotaciono kretanje čestica, pošto sile deluju na dodirne tačke između čestica  $i$  i  $j$  (kontaktne površine), a ne u centru čestica.  $M_{ij}$  je moment sile trenja kotrljanja koji je u suprotnom smeru od rotacije  $i$ -te čestice.

Obrtni moment kotrljanja:

$$T_{ij} = R_i \times (f_{ct,ij} + f_{dt,ij}) \quad (3.13)$$

Obrtni moment trenja:

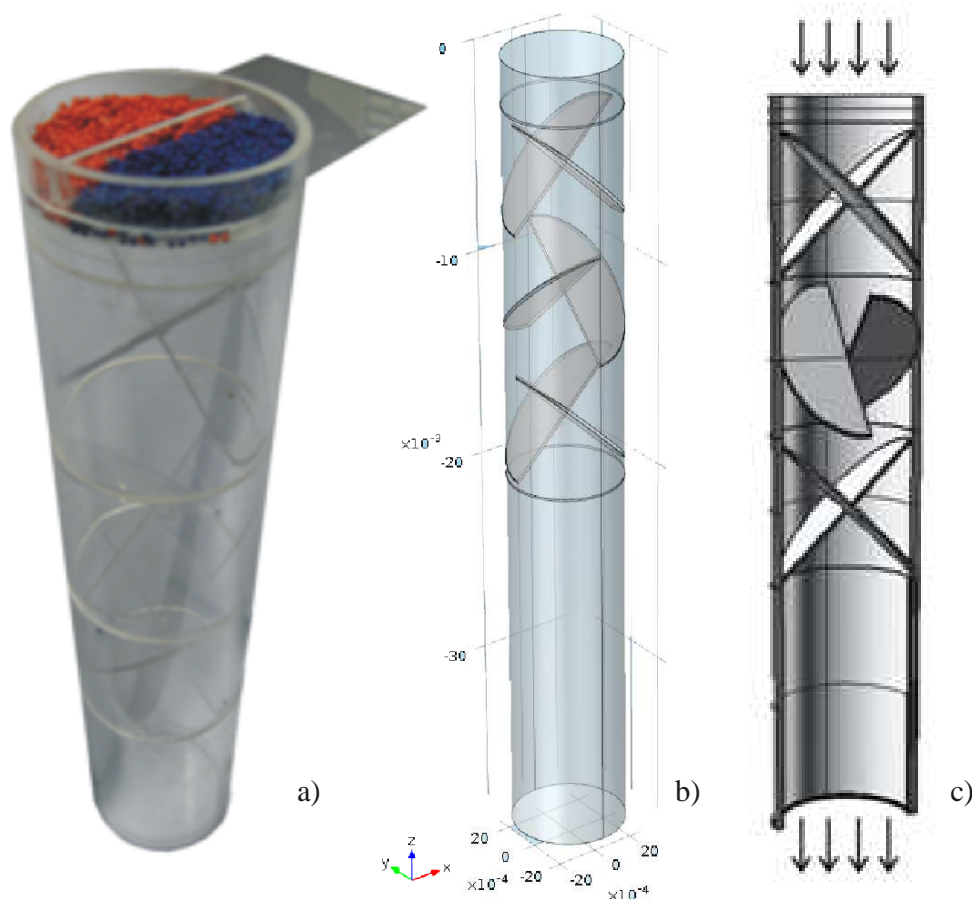
$$M_{ij} = -\mu_r f_{ct,ij} \hat{\omega}_{ij} \quad (3.14)$$

Jednačine koje su se koristile u ovom proračunu za izračunavanje sila i momenata, (3.1) - (3.14) su već u velikoj meri standardizovane i navedeni su u (Zhu i sar,2008). Izračunavanje polja protoka fluida može da se dobije rešavanjem jednačina (3.1) i (3.2), upotrebom standardnog CFD metoda. Polje protok granula/prahova može da se dobije rešavanjem jednačine (3.4) i (3.5) postupkom integracije, za eksplicitno definisano vreme. Modelovanje protoka fluida korišćenjem CFD metode vrši se na numeričkom nivou za svaku pojedinačnu ćeliju, dok se modelovanje toka čestica vrši DEM analizom na nivou svake individualne čestice. Povezivanje DEM i CFD metode se postiže na sledeći način: DEM

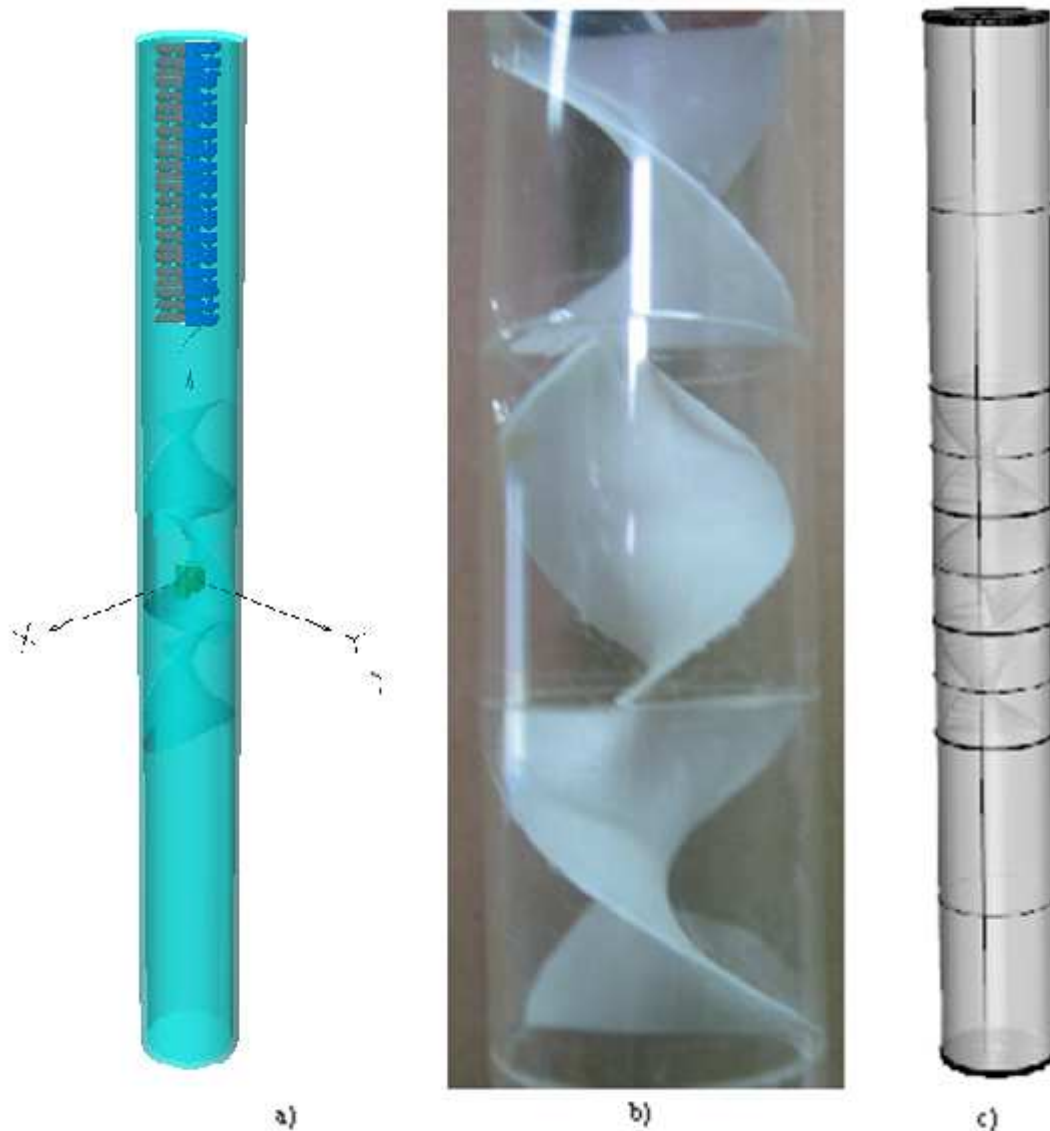


analiza daje informacije o položajima i brzinama pojedinačnih čestica u svakom vremenskom koraku proračuna, što se koristi za ocenu poroznosti i zapreminske sile interakcije fluid-čestice u svakoj ćeliji. CFD analiza zatim koristi ove podatke da se utvrdilo polje protoka fluida u kome se razvijaju sile koje deluju na svaku pojedinačnu česticu. Prosleđivanjem izračunatih sila u DEM analizu, dobijaju se informacije o kretanju svake pojedinačne čestice u toku narednog vremenskog koraka (Chu i sar,2011).

Ovako koncipirani numerički proračuni su izvršeni za različite konfiguracije statičkih mešalica. U proračunu je prvi segment mešalice ispunjen sa 30.000 čestica. Šema mešalice je prikazan na slici 3.7: Ulaz je podeljen na dve komore, prva komora na ulazu u mešalicu je ispunjena sa 15.000 crvenih čestica, a druga komora je ispunjena sa 15.000 plavih čestica. Granični uslovi za model su dati na sledeći način: na izlazu je data vrednost pritiska-atmosferski pritisak (engl. pressure outlet), a strane mešalice i lopatice su u modelu tretirane kao zid mešalice (engl. wall), tj. nepokretni delovi mešalice (slika 3.9a). Uticaj gravitacije je uzet u obzir i predstavlja silu koja potiskuje čestice na dno mešalice.



Slika 3.9. a) Eksperimentalna mešalice (tri-segmenta Ross), b) Šema mešalice tipa Ross - CFD model, c) granica modela



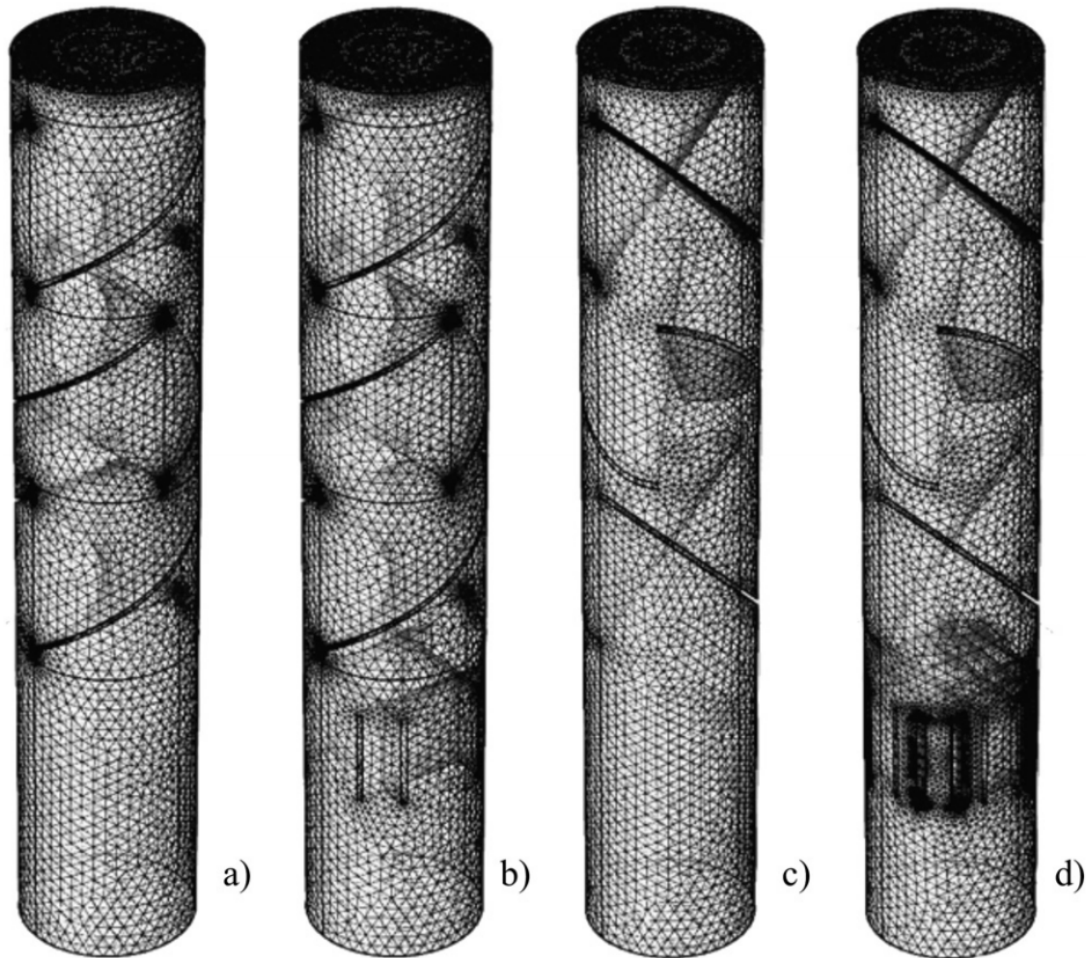
Slika 3.10 a) Šema mešalice tipa Komax-DEM, b) model Eksperimentalna mešalice (tri-segmenta Komax), c) Šema mešalice tipa Komax-CFD model

Matematičkim modelom je predviđeno da je gustina čestica koje se pojavljuju određena srednjom brzinom fluida na ulazu. To znači da se najviše čestice pojavljuje tamo gde je najveća ulazna brzina, a da se manje čestice pojavljuje tamo gde je polje brzina slabije. Pretpostavlja se da je brzina gasa (vazduha) blizu nule, tako da je uticaj fluida na kretanje čestica minimalan.

Eksperimentalna aparatura se sastoji od statičke mešalice, koji je napravljen od transparentnog pleksiglasa. Na ovoj aparaturi su rađeni različiti eksperimenti sa 1, 2 ili 3 Komax elemenata prečnika 60 mm, povezanih u jednoj koloni za mešanje granulastog materijala, sa ili bez pregrade na izlaznom segmentu. Slika. 3.10 c predstavlja 3 Komax elementa, povezana u statičku mešalicu, bez pregrada na izlaznom segmentu. Gornji segment je podeljen na dve pregrade sa barijerom i na tom segmentu je postavljena mobilna zaustava. Male obojene sferne granule zeolita su smešteni u obe pregrade (crvene granule u prvoj pregradi i plave granule u drugom odeljku). Segmenti 1, 2 ili 3 (svaki sa visine od 60 mm) su rotirani za  $90^\circ$  u odnosu na početni segment. Poslednja dva segmenta su visine 90 mm i 10 mm, respektivno. Prvi od ovih segmenata je ili cev, ili cev sa rešetkom na izlazu. Ova rešetka je korišćena da bi se neutralisalo kružno kretanje čestica u blizini zidova mešalice, usled centrifugalne sile. U eksperimentima, ova rešetka je korišćena samo za konfiguraciju koja se sastoji od 3 elemenata mešanja. Poslednji segment služio je za prihvatanje granula zeolita na izlazu iz mešalice, da bi se pokazao efekat mešanja izazvan kretanjem granula kroz mešalicu. Materijal koji se koristi u ovim eksperimentima je u obliku granula zeolita sfernog oblika. Karakteristike granula su predstavljene u Tab. 3.1. Uslovi pod kojima su obavljene eksperimenti su isti kao i kod uslova za numeričku simulaciju.

### 3.7.1.1. Parametri DEM/CFD numeričke simulacije za statičke mešalice

Sistem bilansnih jednačina (jednačina (3.1) -jednačina (3.14)) rešen je korišćenjem metode konačnih zapremina. Numerički metod SIMPLE (engl. Semi Implicit Method for Pressure-Linked Equations) se koristi za rešavanje korekcije pritiska u jednačinama održanja mase i količine kretanja (*Patankar i sar*, 1980)). Trodimenzionalno polje protoka je diskretizovano u Dekartovim (Kartenzijevim) koordinatama. Numerička mreža za proračun (engl. mesh) je napravljena od 109.540 do 111.320 kontrolnih zapremina, kao što je prikazano na slici. 3.11. Ovaj broj obuhvata četiri konfiguracije statičkih mešalica, koje se koriste za numeričke simulacije: a) 3 Komax elementa, b) 3 Komax elementa sa segmentom u kome se nalazi mreža kvadratnog preseka za smirivanje toka materijala, c) 3 Ross elementa i d) 3 Ross elementa sa segmentom za smirivanje toka. Izvedena je optimizacija numeričke mreže, koja je pokazala da daljim povećanjem broja ćelija u kontrolnoj zapremini nema značajne promene u rezultatima simulacije. Elementi koji se koriste u numeričkoj mreži su tetraedri sa veličinom elementa manjom od  $10^{-8} \text{ m}^3$ .



Slika 3.11. Numerička mreža koja se koristi za simulaciju a) Ross, b) Komax, bez i sa pregradama za smirivanje toka materijala u donjoj zoni

Diskretizacija parcijalnih diferencijalnih jednačina vrši se njihovom integracijom u kontrolnim zapreminama za osnovnu i optimizovanu mrežu. Član konvekcije je usklađen sa unaprednim konačnim razlikama, dok su difuzioni i izvorni članovi računati centralnim razlikama. Primenjeno je potpuno implicitno vreme integracije. Skup algebarskih jednačina se rešava iteracijama korišćenjem algoritma trodijagonalne matrice TDMA (engl. Three-Diagonal-Matrix Algorithm), (*Patankar*, 1980).

Tokom rešavanja bilansnih jednačina procesa u obliku sistema linearnih algebarskih jednačina, korišćenjem iteracija, računaska greška je držana u granici  $10^{-5}$  u svakoj kontrolnoj zapremini. DEM metoda zahteva mnogo manji vremenski korak nego CFD. Vremenski korak za CFD je deset puta veći od vremenskog koraka za DEM. Vremenski korak za DEM je

ograničen prirodnim periodom oscilacija sistema opruga-masa koji se koristi za modelovanje kontakata čestica. Ovaj vremenski korak bi trebalo da zadovolji sledeću jednačinu:

$$\Delta t_{DEM} \leq \frac{1}{10} 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} \quad (3.15)$$

gde je:  $m$  masa čestice i  $k$  koeficijent krutosti. Uslovi simulacije i parametri procesa su dati u Tabeli 3.1.

Tabela 3.1. Uslovi simulacije i parametri za modelovanje procesa.

Parametar	Vrednost
Dimenzije mešalice, $r \times l$ (mm $\times$ mm)	60 $\times$ 280
Broj čestica	30.000
Prečnik čestice, (mm)	2
Brzina fluida-početna, (m/s)	0
CFD vremenski korak, (s)	$5 \times 10^{-5}$
DEM vremenski korak, (s)	$5 \times 10^{-6}$
Gustina fluida, (kg/m <sup>3</sup> )	1.2
Viskoznost fluida, (kg/ms)	$1.8 \times 10^{-5}$
Koeficijent trenja čestice	0.3
Youngov model elastičnosti	107
Poissonov odnos veličina čestica	0.25

### 3.7.2. DEM/CFD model za obrtnu statičku mešalicu tipa Komax

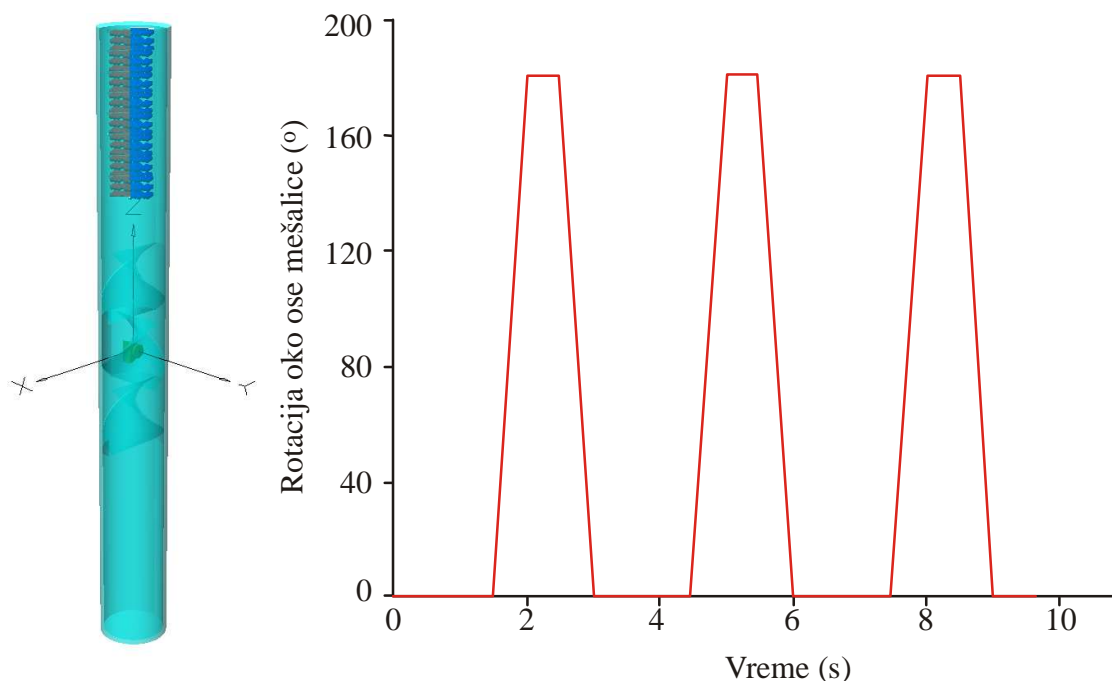
Tok simulacije DEM analize prikazan je na primeru statikog mixera tip Komax-a sa tri elementa, pri kretanju čestica pri jednom, dva i tri obrta. Statička mešalica se obrće oko ose  $y$ , prema zakonu prikazanom na slici 3.12. b.

Slika. 3.12 a predstavlja 3 Komax elementa, povezana u statičku mešalicu, bez pregrada na izlaznom segmentu. Gornji segment je podeljen na dve pregrade sa barijerom i na tom segmentu je postavljena mobilna zaustavašto se vidi na slici 3.9a. Male obojene sferne granule zeolita su smešteni u obe pregrade (crvene granule u prvoj pregradi i plave granule u

drugom odeljku). Segmenti 1, 2 ili 3 (svaki sa visine od 60 mm) su rotirani za  $90^\circ$  u odnosu na početni segment. Prvi i poslednji segment služili su za prihvatanje granula zeolita na izlazu iz mešalice, da bi se pokazao efekat mešanja izazvan kretanjem granula kroz mešalicu. Materijal koji se koristi u ovim eksperimentima je u obliku granula zeolita sfernog oblika. Karakteristike granula su predstavljene u Tab. 3.1. Uslovi pod kojima su obavljene eksperimente su isti kao i kod uslova za numeričku simulaciju.

### 3.7.2.1. Parametri DEM/CFD numeričke simulacije za obrtnu statičku mešalicu tipa Komax

Sistem bilansnih jednačina (jednačina (3.1) - jednačina (3.14)) rešen je korišćenjem metode konačnih zapremina, kao u poglavlju 3.4.1.1.

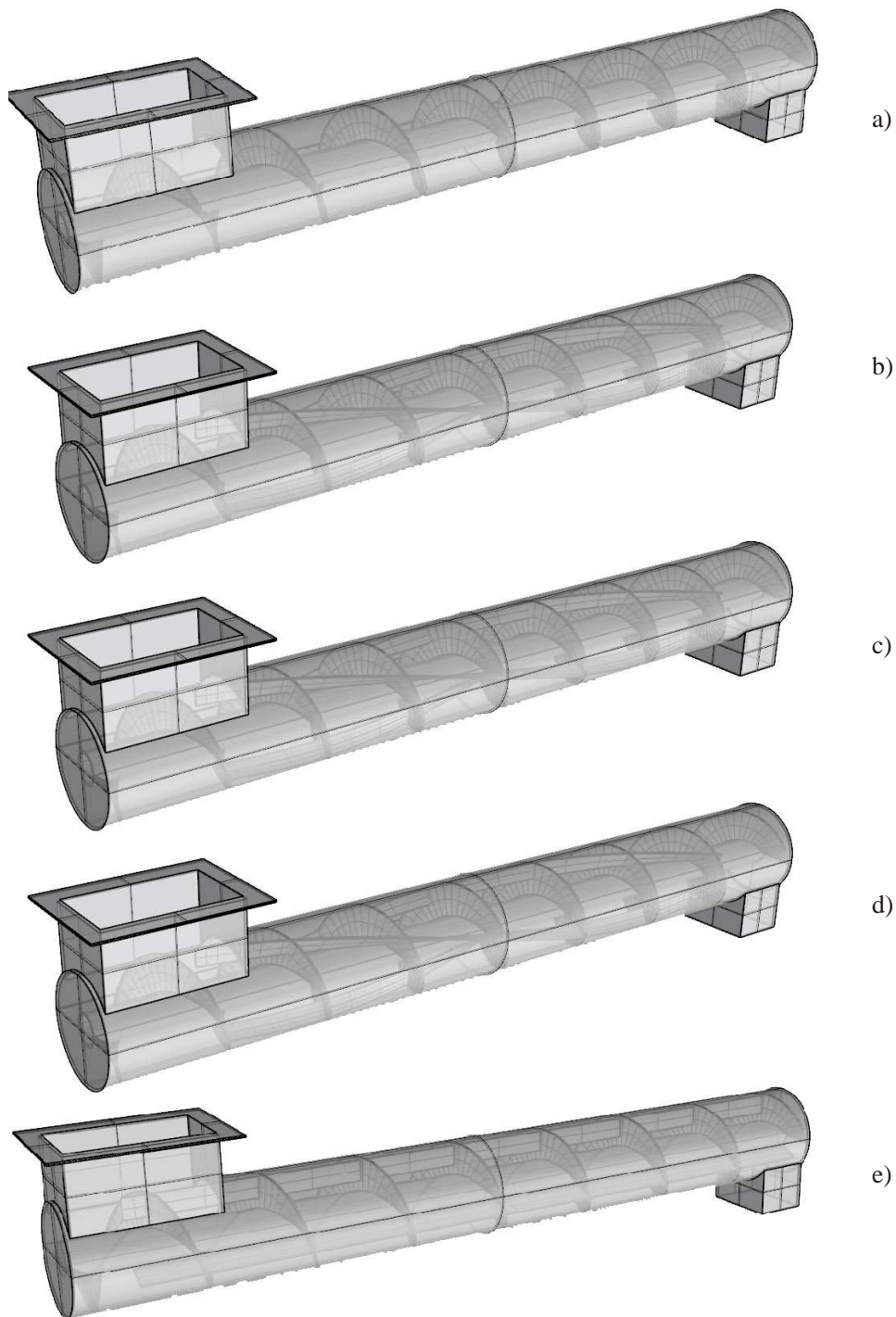


Slika 3.12. a) DEM model obrtni Komax, b) zakon obrtanja

### 3.7.3. DEM model za modifikovane pužne transportere

DEM simulacija podrazumeva praćenje položaja, brzine i ubrzanja svih čestice koje su uključene pri definisanju modela i modelovanje svakog sudara: između pojedinačnih čestica i između čestica i zid.

Na slici 3.13 prikazani su modeli modifikovanih pužnih transporterera dužine 400 mm.



Slika 3.13 Modifikovani pužni transporteri, a) puž sa konstantnim korakom zavojnice, b) modifikovani pužni transporter sa tri dodatne zavojnice orijentisane u istom smeru kao i spirala puža, c) modifikovani pužni transporter sa tri dodatne zavojnice orijentisane u suprotnom smeru od spirale puža, d) modifikovani pužni transporter sa tri skraćene zavojnice

orijentisane u suprotnom smeru od spirale puža, e) modifikovani pužni transporter sa tri dodatne pravolinijske lopatice

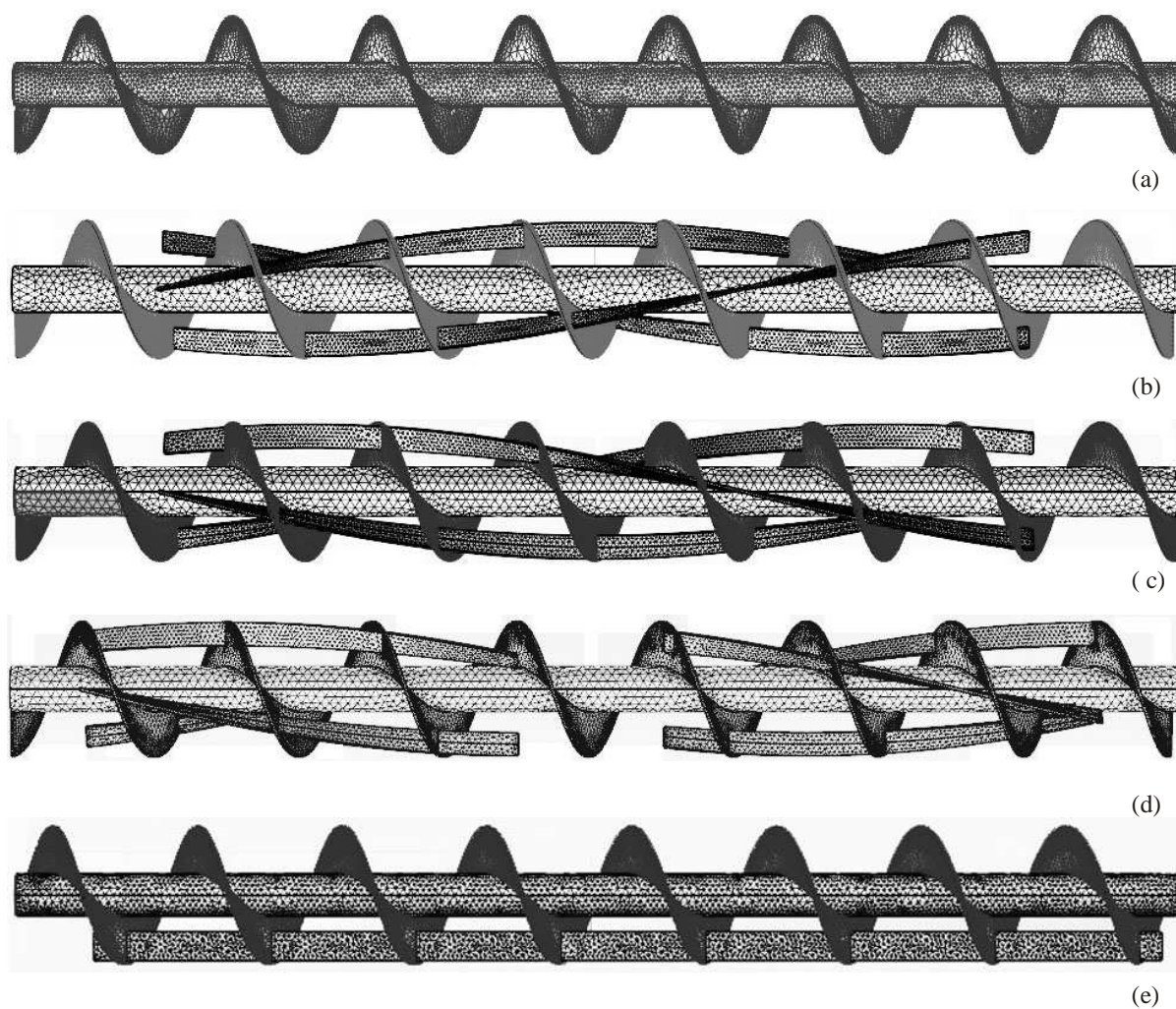
U ovom slučaju interakcije pojedinačnih čestica i zida su veoma složene, zbog geometrije pužnog transportera. Pužni transporter je u modelu predstavljen pužnom zavojnicom tako da se tokom simulacije javlja nekoliko površina i ivica koje se seku sa graničnim površinama čestica. Ovako kompleksna geometrija zavojnice predstavlja najveću teškoću u modelovanju, i o tome će kasnije biti reči. Granica geometrija pužnog transportera je definisana korišćenjem CAD paketa i uvezena u DEM paket, kao trougaona mreža, u obliku IGES datoteke.

Na slici 3.14 prikazane su mreže modela zavojnica modifikovanih pužnih transportera dužine 400 mm puža sa konstantnim korakom zavojnice, modifikovanog pužnog transportera sa tri dodatne zavojnice orijentisane u istom smeru kao i spirala puža, modifikovanog pužnog transportera sa tri dodatne zavojnice orijentisane u suprotnom smeru od spirale puža, modifikovanog pužnog transportera sa tri skraćene zavojnice orijentisane u suprotnom smeru od spirale puža i modifikovanog pužnog transportera sa tri dodatne pravolinijske lopatice.

Ovaj način obezbeđuje neograničen fleksibilnost u definisanju trodimenzionalne geometrije, sa kojim će čestice stupati u interakciju. Čestice su aproksimirane sferama, prečnika 2 mm.

Tehnika modelovanja u DEM analizi se zasniva na pretpostavci da su čestica fleksibilne (tzv. metoda meke čestice, engl. soft particle method), i da je česticama dozvoljeno da se preklapaju. Mera preklapanja je definisana u tabeli 3.3, a normalna i tangencijalne relativne brzine određuju sile preklapanja. Sila sudaranja je predstavljena stepenom preklopa čestica koja se javlja u dodiru, umesto da se računa stvarna deformacija čvrste čestice. Normalna sila izaziva samo translaciono ubrzanje, a tangencijalne (ili smičuća) sila dovodi do translacionog i rotacionog ubrzanja. Matematička simulacija se koristi za praćenje lokacije i brzine drugih čestica i pomerljivih površina u odnosu na posmatranu česticu. Zbir svih sila koje deluju na čestice određuje se za svaku česticu za svaki vremenski interval simulacije. Zbirno ubrzanje koje nastaje usled rezultujuće sile (od kontakta tela) koje deluju na čestice se obračunava po drugom Njutnovom zakonu kretanja. Brzine i položaj čestice se izračunavaju za svakom vremenski korak. Ovim pristupom moguće je modelovanje dinamičkog ponašanje granula u protoku u složenoj 3-dimenzionalnoj geometriji. DEM analiza se koristi za ispitivanje putanju svake čestice, tokom transporta, s obzirom na razlike u geometriji zavojnica pužnih transportera, (Cleary, 2001 i Cleary i sar, 1997).





Slika 3.14 Mreže modela za. a) Puž sa konstantnim korakom zavojnice, b) Modifikovanog pužni transporter sa tri dodatne zavojnice orijentisane u istom smeru kao i spirala puža, c) Modifikovani pužni transporter sa tri dodatne zavojnice orijentisane u suprotnom smeru odspirale puža, d) Modifikovani pužni transporter sa tri skraćene zavojnice orijentisane u suprotnom smeru od spirale puža, e) Modifikovani pužni transporter sa tri dodatne pravolinijske lopatice

U pužnom transporteru, rasuti materijal se transportuje kroz cev u kojoj se pokreće pužna spirala. U ovom radu se proučava transport rasutog materijala u pet vrsta modifikovanih pužnih transportera - mešalica, sa tri različite dužine. Vršena je procena performansi mešanja izračunavanjem putanju rasutih čestica kroz pužni transporter - mešalicu i procena kvaliteta umešavanja.

Kontakt između dve čestice se javlja na geometrijskom prostoru konačnih dimenzija koji nastaje usled deformacije čestica, što je ekvivalentno kontaktu dva kruta tela kojima je

dozvoljeno da malo preklapaju (prema DEM analizi), (Zhu i sar, 2007). Rezultujuća kontaktna sila u ovoj oblasti može da se razloži na komponentu u kontaktnoj ravni (ili tangencijalnoj ravni) i jednu komponentu normalnu na tu ravan, dok se procena ukupne snage i obrtnog momenta koja deluje na čestice vrši u odnosu na mnoge geometrijske i fizičke faktore kao što su oblik čestica, fizičke osobina materijala i stanje čestica, (Cundell i Stack, 1979). U DEM analizi se obično usvajaju pojednostavljeni modeli da bi se utvrdile snage i momenti koje proističu iz kontakta između čestica.

Prema DEM modelu, translaciono i rotaciono kretanje čestica u bilo kom trenutku,  $t$ , može se opisati Njutnovim zakonom kretanja, (Cundall i Stark, 1979):

$$m_i \frac{dv_i}{dt} = F_{n,i} + F_{s,i} + m_i g \quad (3.16)$$

i

$$I_i \frac{d\omega_i}{dt} = R F_{s,i} \quad (3.17)$$

gde  $m_i$ ,  $I_i$ ,  $v_i$  i  $\omega_i$  su, respektivno, masa, moment inercije, translaciona i rotacione brzine čestice  $i$ .

Sile koje deluju na česticu  $i$  su normalna sila  $F_{n,i}$ , sila smicanja  $F_{s,i}$ , i gravitaciona sila  $m_i g$ .

Interakcije čestica - čestica, koje se koriste u ovom modelu su prvo predložili Walton i Braun (Walton i Braun, 1986 i Walton, 1993).

Sila sudara se izračunava preko stepena preklapanja čestica ( $\alpha$ ) koji se posmatra umesto da se računa stvarna deformaciju čestice. Ova metodologija je poznat kao pristup fleksibilne ("meke") čestice. Skalarna vrednost normalne sile ( $F_n$ ) je izračunava kao (Hou i Dong, 2014):

$$F_n = k_1 \alpha \quad (\alpha \text{ se povećava}) \quad (3.18)$$

$$F_n = k_2 (\alpha - \alpha_0) \quad (\alpha \text{ se smanjuje}) \quad (3.19)$$

gde su  $k_1$  i  $k_2$  konstante krutosti (Maysey i Thomson, 2005), a  $\alpha_0$ , je vrednost preklapanja pri nultoj normalnoj sili. Sekundarna konstanta krutosti,  $k_2$  uzima se kao konstanta u modelu (mada to može da bude funkcija brzine uticaja (Zhu i sar, 2008), koji daje konstantan koeficijent restitucije ( $\varepsilon$ ):

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{k_1}{k_2}} \quad (3.20)$$

Tangencijalna sila, koju su takođe odredili (Walton i Braun, 1986) uključuje i translatorno i rotaciono ubrzanje. Magnituda tangencijalne sile (ili smicanja) se određuje na osnovu količine tangencijalnog klizanja u poslednjem vremenskom koraku i na osnovu istorije prethodnih kontakata, a ograničen je koeficijentom trenja,  $\mu$  u  $\mu F_n$ .

Shiloh smicanja ( $F_s$ ) je definisana (Walton i Braun, 1993):

$$F_s = \mu F_n \quad (3.21)$$

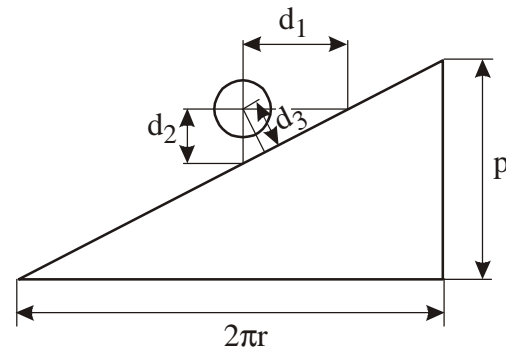
gde je  $\mu$  je koeficijent trenja. Ovakav pristup je predložen u (Walton i Braun, 1993), a zasniva se na iznosu preklapanja, između čestica i zavojnice puža tokom sudara. Tangencijalna površina klizanja se izračunava na osnovu rotacije dve sfere i relativne brzine površine na mestu kontakta, uzimajući u obzir koeficijent trenja (Zhong i Callaghan, 1990 i Walton i Braun, 1993). Sila smicanja kontakata čestica-čestica je ograničena sa  $\mu_p F_n$ , pri čemu je  $\mu_p$  koeficijent trenja.

Za slučaj kontakta između čestice - zida, maksimalna sila smicanja definisana je sa  $\mu_w$  koji predstavlja koeficijent trenja za zid. Zid je geometrijski definisan kao spirala, i da bi se odredila sila u kontaktu čestice i zida neophodno je da se zavojnica definiše odgovarajućim matematičkim modelom. Za definisanje kontakta između čestice i zida bilo je neophodno da se opiše spirala sa odgovarajućim matematičkim modelom (Moysey i sar, 2013). Kontaktna sila sistema čestica - zid izračunava na sličan način kao i kod sistema čestica- čestica koji je opisan u prethodnom delu, na osnovu pristupa Walton i Braun (Walton i Braun, 1986 i Walton, 1993). Detekcija kontakta na spiralnoj površini "troši" najviše računarskog vremena u simulaciji, zbog prirode zavojnice.

Da bi se numerički rešio opisani problem, bilo je neophodno da se modeluje pužni transporter korišćenjem dovoljno sličnog, odgovarajućeg geometrijskog oblika. Pužna zavojnica se može opisati kao spirala. Parametarski opis zavojnice u cilindričnim koordinatama je

$$\vec{r}(\theta) = R \cos \theta \vec{i} + R \sin \theta \vec{j} + \frac{p}{2\pi} \theta \vec{k} \quad (3.22)$$

gde je  $p$  korak zavojnice,  $R$  poluprečnik i  $\theta$  ugao od  $x$  ose u  $xy$  ravni, slika 3.15



Slika 3.15. Šematski dijagram za numeričku simulaciju zavojnice

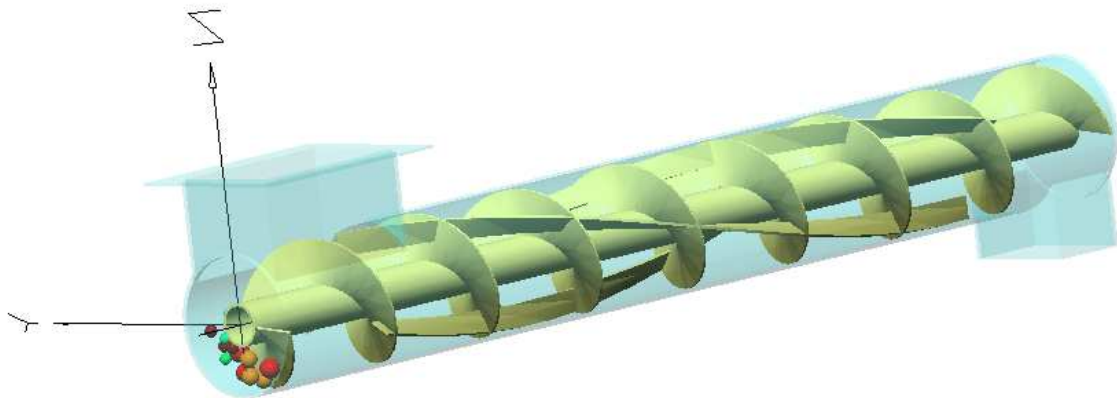
Udaljenost između centara granuliranih čestica i ivica pužne spirale se može definisati kao (Shimizu i Cundall,2001 i Moysey i Thompson,2005):

$$d_1 = \sqrt{(R \cos \theta_p)^2 + (R \sin \theta_p)^2} \quad (3.23)$$

$$d_2 = z_p - p \frac{\theta_p}{2\pi} \quad (3.24)$$

$$d_3 = \left( z_p - \frac{p}{2\pi} \theta_p \right) \cos \phi_p \quad (3.25)$$

Udaljenost  $d_3$  mora da bude manja od radijusa čestice,  $R$ , za slučaj kontakta sa zavojnicom koja se okreće u toku transporta materijala (Fernandez i sar, 2011).



Slika 3.16. Šema modifikovanog pužnog transportera sa tri dodatne zavojnice orijentisane u istom smeru kao i spirala

DEM simulacija je urađena sa istim uslovima kao i u eksperimentu (veličina i oblik čestice).

Numerička izračunavanja su izvršena za različite konfiguracije pužnih transportera. Pužni transporter - mešalica je ispunjen sa oko 1.000 čestica (500 i 500 crveno plave čestice),

a zid je predstavljen drugom stranom pužnog transportera. Uticaj gravitacije se uzima u obzir i predstavljen je silom koja uzorkuje da čestice padaju na dno cevi.

Sam tok simulacije DEM analiza prikazana je na primeru modifikovanog pužnog transportera sa tri dodatne zavojnice orijentisane u istom smeru kao i spirala.

Na slici 3.16 je prikazan DEM model modifikovanog pužnog transportera sa tri dodatne zavojnice orijentisane u istom smeru kao i spirala.

### 3.7.3.1. Parametri DEM modela za modifikovane pužne transportere

Posmatrano je petnaest različitih reprezentativnih slučajeva (pet vrsta modifikovanih pužnih transportera i tri različite dužine puža). Na osnovu upoređivanja kvaliteta procesa mešanja, iskazanim preko izračunatog kriterijuma RSD, pokazalo se da su numerički rezultati u dobroj saglasnosti sa eksperimentalnim rezultatima upoređivanjem kvaliteta procesa mešanja, (*Moysey i Baird, 2009*).

Tabela 3.2. Uslovi simulacije i parametri za modelovanje

Parametar	Vrednost
Gustina čestice ( $\text{kg/m}^3$ )	500
Poisson-ov obroj za čestice	0,25
Koeficijent trenja čestica	0,3
Srednje preklapanje između čestica i graničnih površina (%)	0,1–0,5
Koeficijent trenja zida	0,3
Prečnik čestice (mm)	4
Konstanta opruge (N/m)	1000
Parametar stišljivosti čestice u DEM analizi (kN/m)	50
Broj čestica	10.000

Tabela 3.3. Geometrija pužnog transportera

Paramater	Vrednost
Korak puža (mm)	50
Prečnik vratila puža (mm)	15
Debljina lima zavojnice (mm)	približno 1
Unutrašnji prečnik cevnog kućišta (mm)	47
Zazor između spoljne ivice zavojnice puža i unutrašnje površine cevnog kućišta (mm)	1.5
Dužina pužnog transportera (mm)	400; 600; 800
Rotaciona brzina (rpm)	20
Broj dodatih elemenata	3
Debljina lima dodatih elemenata (mm)	1
Širina dodatnog elementa	10

## 4. REZULTATI I DISKUSIJA

### 4.1. Ispitivanja materijala (zeolit i samleveni kukuruz) upotrebljenih za testove mešanja

#### 4.1.1. Sadržaj vode

##### a) Sadržaj vode u granulama zeolita

Vrednosti sadržaja vode određen je u dva merenja- srednja vrednost iznosi 9,85%. Sadržaj suve materije uzoraka granula zeolita određen je sušenjem materijala na 105°C, 24 sata u komori za sušenje (Instrumentaria Sutjeska, Croatia).

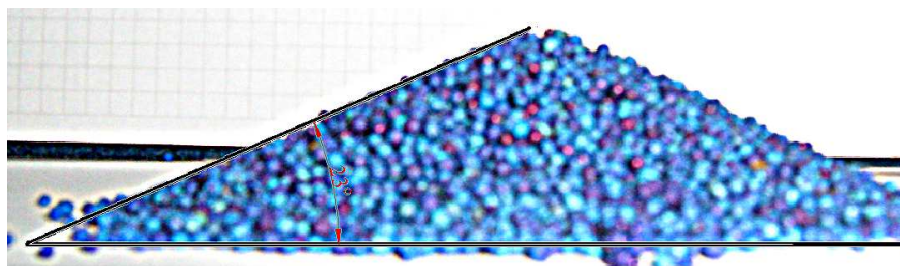
##### b) Sadržaj vode u kukuruzu samlevenom na mlinu čekićaru sa otvorom sita od 3 mm

Vrednosti sadržaja vode određen je u dva merenja i iznosi 9,65% i 9,83% i kao takav se kreće u granicama predviđenim Pravilnikom o kvalitetu hrane za životinje (*Sl. list RS, 4/2010*), član 8, kojim se definiše sadržaj vode u kukuruznoj prekrupi kao sirovini za hranu za životinje (maksimalno dozvoljen nivo 14%). Takođe, ove vrednosti su, prema istom Pravniku, u okviru granica predviđenih za smeše za ishranu životinja (12 – 13.5%).

#### 4.1.2 Granulacija i protočne karakteristike

##### a) zeolit

Mehaničke, fizičke i hemijske karakteristike zeolita su detaljno analizirane u literaturi, (*Perry, 1997* i *Lin, 2005*). Nasipni ugao zeolita je dobijen fotografisanjem i merenjem ugla u odnosu na horizontalnu ravan i iznosi 23°, slika 4.1.



Slika 4.1. Nasipni ugao za zeolit

## b) kukuruzna prekrupa samlevene na mlinu čekićaru

Granulometrijski sastav kukuruzne prekrupe samlevene na mlinu čekićaru, koji je upotrebljen za testove u statičkoj mešalici, prikazani su u tabeli 4.1.

Tabela 4.1. Granulometrijski sastav samlevene kukuruzne prekrupe.

Prečnik otvora sita ( $\mu\text{m}$ )	Masa na situ (g)	Maseni udeo (%)	Kumulativna raspodela veličine čestica (%)
$d_i$	$W_i$	$P_i$	$Q$
3150	0,00	0,00	100,00
2500	0,28	0,29	99,71
2000	4,43	4,55	95,16
1600	12,38	12,72	82,44
1000	28,28	29,06	53,38
630	19,61	20,15	33,23
250	16,85	17,32	15,91
125	9,04	9,29	6,62
63	6,04	6,20	0,42
dno	0,40	0,42	0,00
$\Sigma$	97,30	100	

gde su:  $d_i$  - Prečnik otvora sita ( $\mu\text{m}$ ),  $W_i$  - Mase na sitima (g),  $P_i$  - Maseni udeo (%),  $Q$  - Kumulativna raspodela (%) - udeo čest. manjih od  $d_i$ .

Geometrijski srednji prečnik samlevene kukuruzne prekrupe iznosio je 694,73  $\mu\text{m}$ , što odgovara vrednostima za smeše koje se uobičajeno koriste u ishrani životinja (*Healy i sar.*, 1994; *Mavromichalis i sar.*, 2000; *Amerah i sar.*, 2007;). Prema A.S.A.E. (2003), kada je geometrijska standardna devijacija jednaka 1 sve čestice su iste veličine, dok vrednosti oko 3 ili više ukazuju na velike varijacije u veličini čestica. Dobijena vrednost geometrijske standardne devijacije, koja je iznosila 2,42, ukazuje na široku raspodelu veličine čestica



samlevene kukuruzne prekpupe koja takođe odgovara vrednostima za smeše za ishranu životinja.

Nasipna masa samlevene kukuruzne prekrupe iznosila je  $639 \text{ g/dm}^3$ , dok je ugao nasipanja imao vrednost  $39^\circ$  koja ukazuje na zadovoljavajuću protočnost. *Naime*, 1996). Ako je ugao nasipanja manji od  $35^\circ$  protočnost je dobra, u rasponu od  $36$  do  $40^\circ$  je zadovoljavajuća, od  $41$  do  $45^\circ$  prihvatljiva, a preko  $46^\circ$  loša (*Axe*, 1996).

## 4.2. Homogenost materijala u statičkim mešalicama

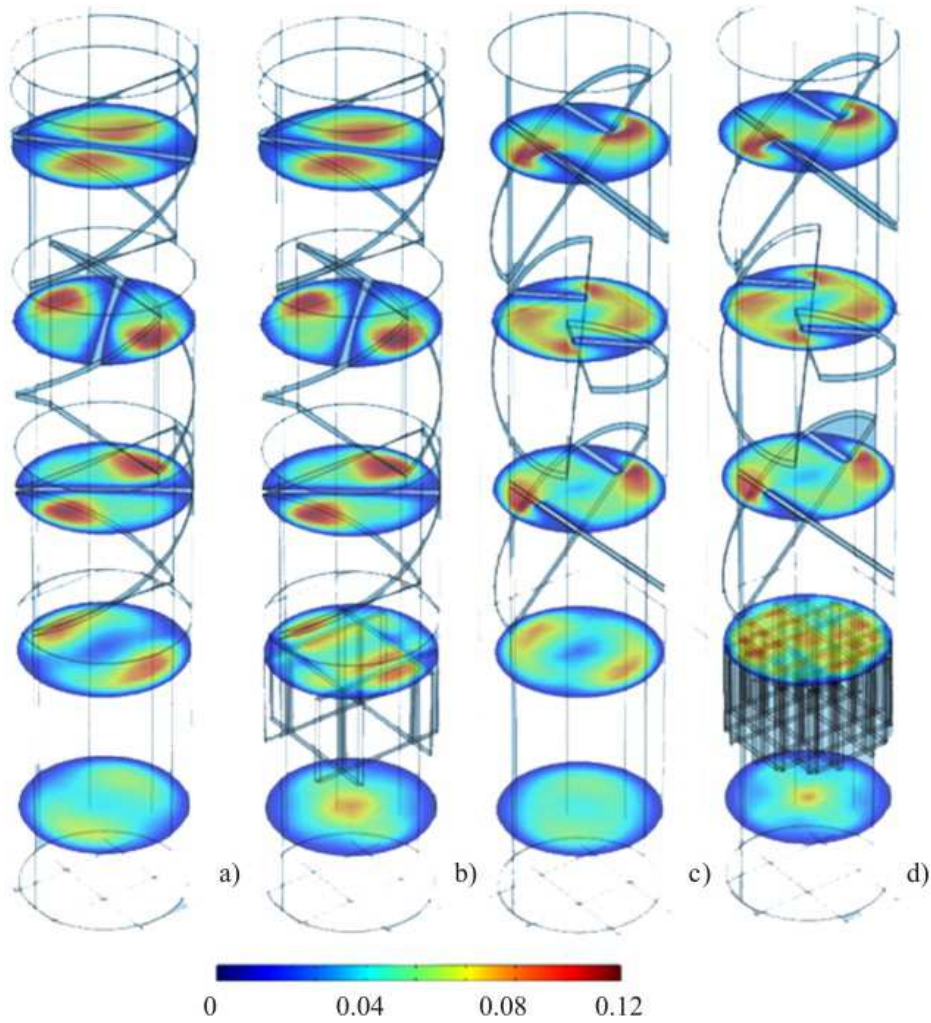
### 4.2.1. Kvalitet homogenosti mešavine kuglica zeolita primenom DEM/CFD simulacija nakon mešanja u statičkim mešalicama tipa Ross i Komax

Numeričke simulacije statičkih mešalica različitih geometrija i različitih parametara procesa mešanja su urađene u daljem toku istraživanja. Šeme statičkih mešalica tipa Ross i Komax su prikazane na slici 3.5 i 3.6. DEM/CFD simulacija je upoređena sa eksperimentalnim rezultatima. Mehaničke osobine granula zeolita su prikazane u literaturi (*Perry i Green*, 1997 i *Lin i sar.*, 2005).

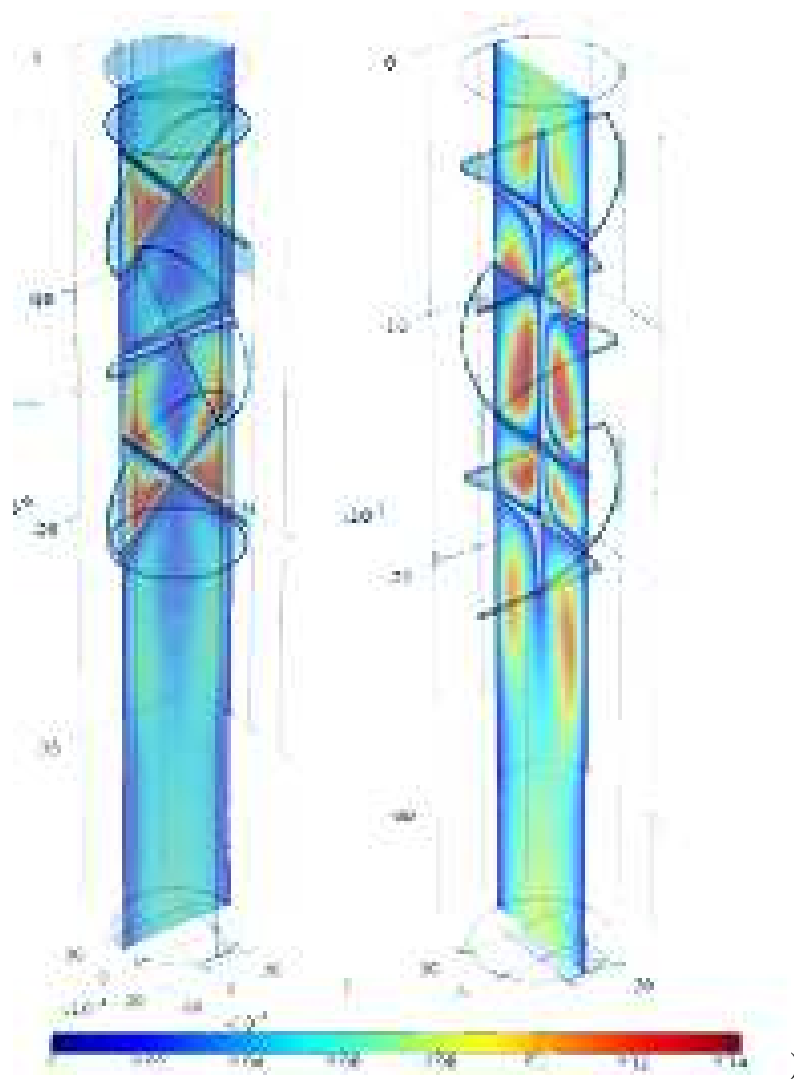
Model je rešen u dve faze, u prvoj je izračunato polje brzina fluida i polja pritisak, a zatim, koristeći posebnu studiju, izračunate su trajektorije čestica.

U nastavku rada, slika 4.2 - 4.5, prikazano je osam različitih reprezentativnih slučajeva (konfiguracije sa 1, 2 i 3- Ross elementa, zatim konfiguracije sa 1, 2 i 3 Komax elementa, 3-segmentna Ross mešalica sa dodatnom pregradom i 3-segmentna Komax mešalica sa dodatnim pregradom). Svi rezultati su upoređeni sa eksperimentalnim rezultatima, kada se upoređivanje vrši za kvalitet procesa mešanja, u pogledu kriterijuma relativne standardne devijacije, RSD, (*Lemieux i sar.* 2008).

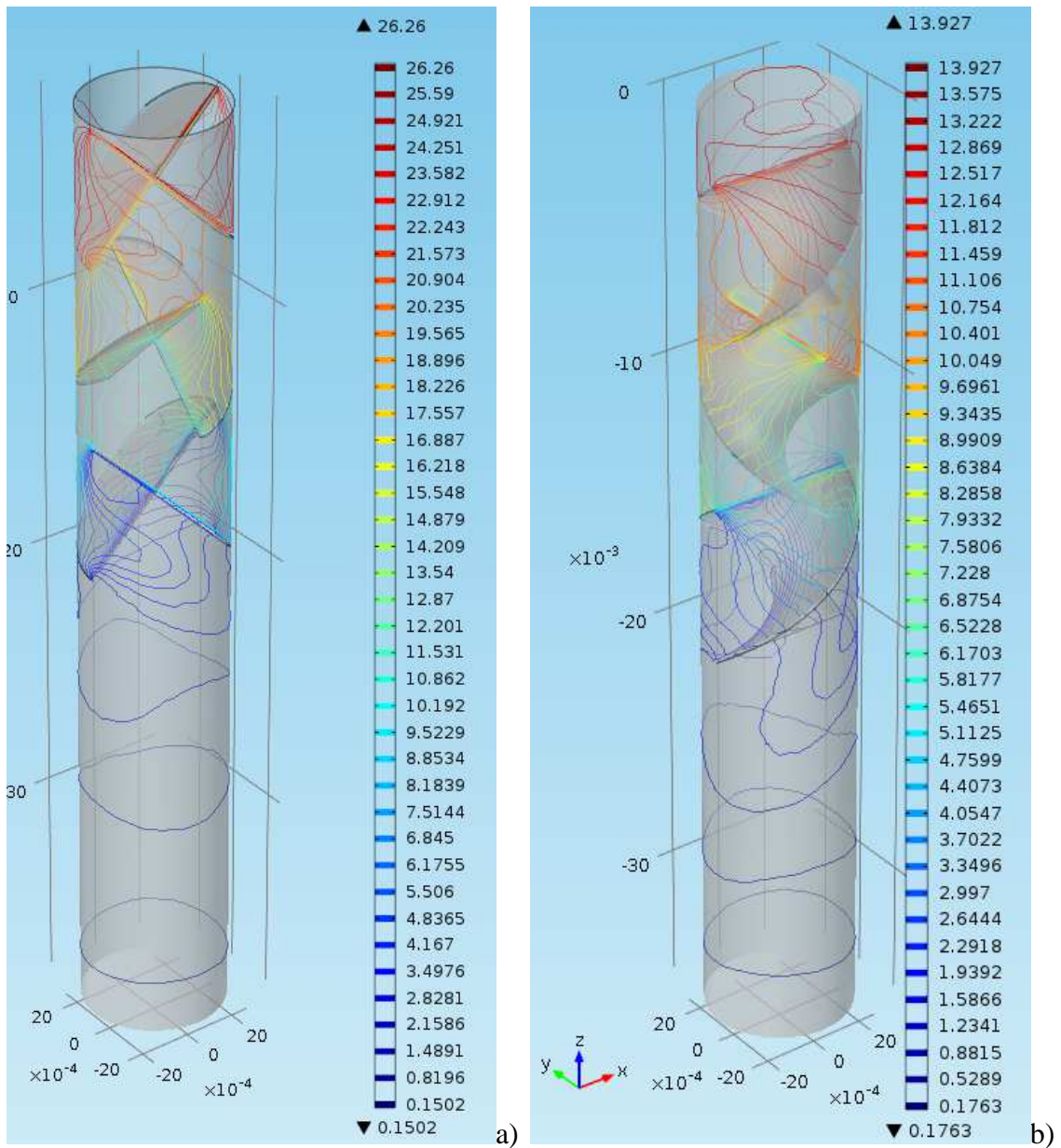
Korišćenjem CFD proračuna, na osnovu jednačina iz prethodnog poglavlja, dobijeno je polje brzina i pritisaka za fluid, slike 4.2 - 4.5. Ove slike pokazuje tendenciju grupisanja čestica, a korišćenjem pregrade se onemogućava kretanje čestica po obodu, usled centrifugalne sile.



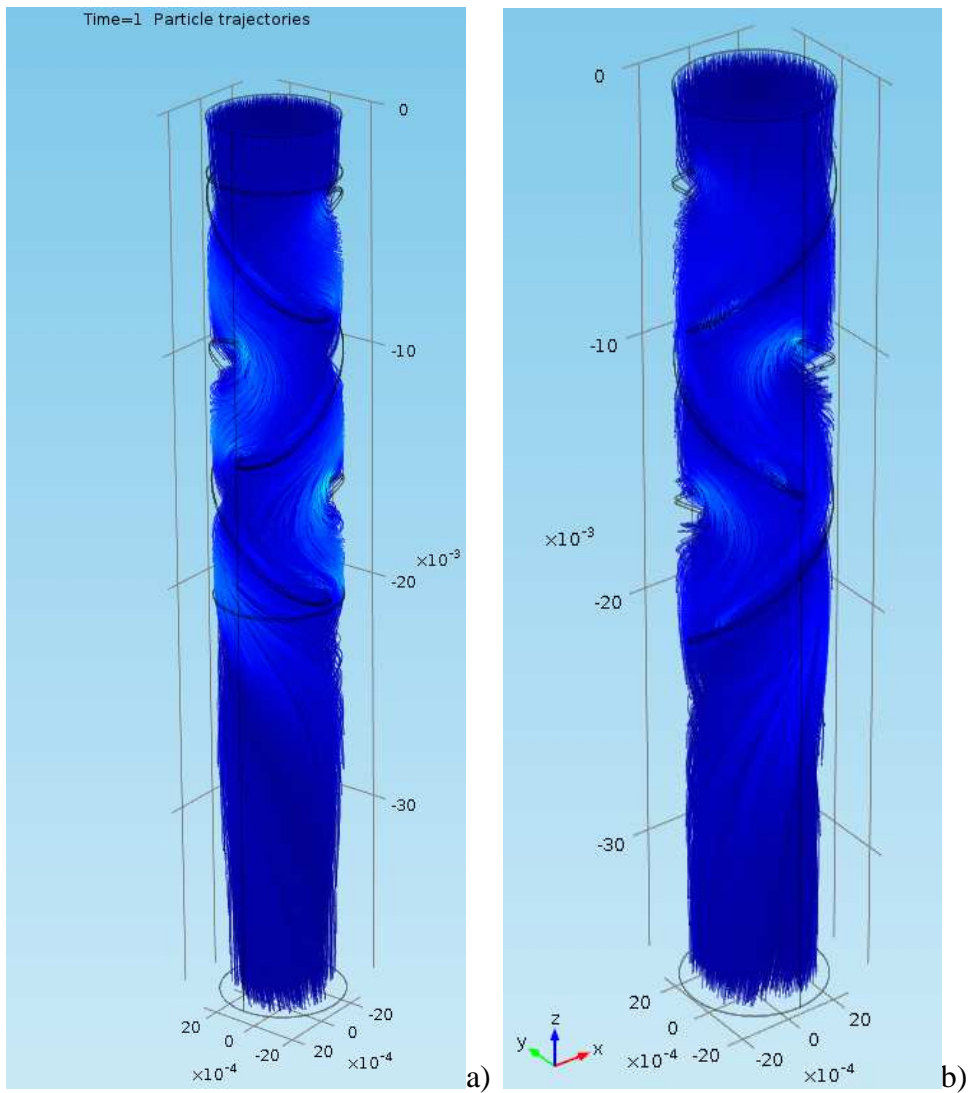
Slika 4.2. a) Polje brzina za fluidnu fazu u ravni (xy) (m/s) u karakterističnim presecima a) Ross, b) Ross sa segmentom za smirivanje toka materijala, c) Komax, d) Komax sa segmentom za smirivanje toka materijala



Slika 4.3. Polje brzina za fluidnu fazu za uzdužni presek u ravni (zy) (m/s) a) Ross, b) Komax



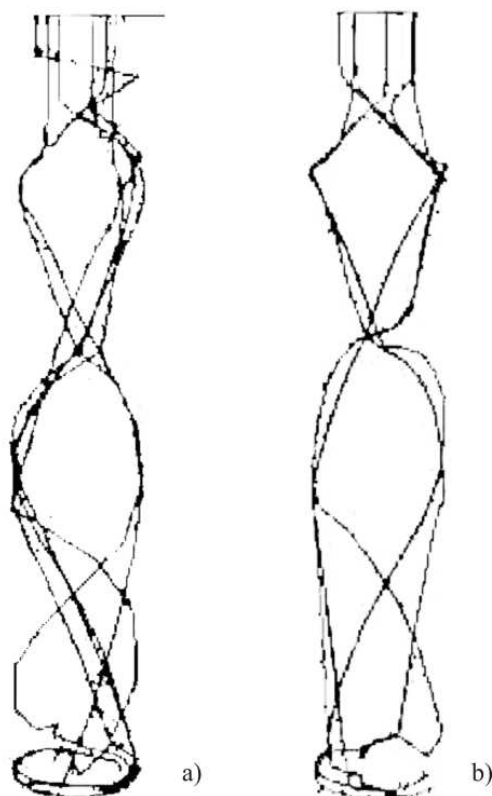
Slika 4.4. Polje pritisaka za fluidnu fazu (Pa), a) Ross, b) Komax



Slika 4.5. Trajektorije čestica za fluidnu fazu a) Ross, b) Komax

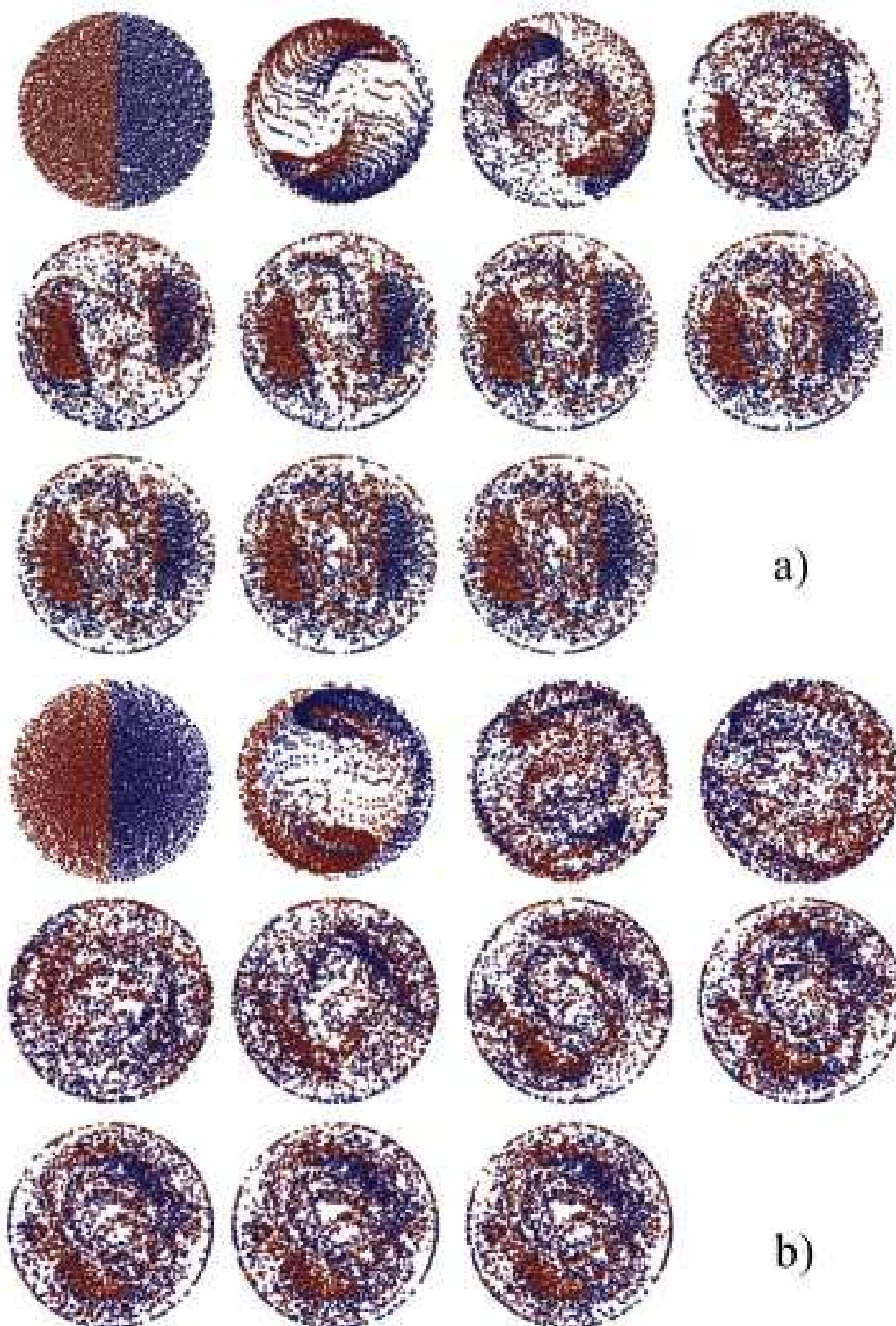
Portret faza u procesu mešanja može da se koristiti za vizualizuju efekta mešanja čestica, ali nije toliko korisan kao Poankareove mape, jer se na osnovu nje dobijaju informacije za svaku česticu u datom trenutku vremena, umesto za ravan u prostoru.

Trajektorije čestica su grafički prikazane na slici 4.6.



Slika 4.6. Rezultati numeričke simulacije (trajektorije čestica)

Poenkareov grafik, slika 4.7, je korišćen da bi se predstavilo na koji način se čestice mešaju. Na Poenkareovom grafiku svaka pojedinačna tačka se boji odgovarajućom bojom na mestu prolaza te tačke kroz poprečnu ravan (poznate kao Poenkareov presek) normalnu na osu mešalice. Na slici 4.7 prikazano je: a - 3-segmenta Komax konfiguracija i b - 3 segmenta Ross konfiguracija mešalice, pri čemu su lokacije čestica prikazane u 11 Poenkareovih preseka. Parametar čestice "boja" je logička konstanta se koristi da označavanje početno dodeljene vrednosti boja čestice, u zavisnosti položaja čestice: na pozicijama  $x < 0$  (crvena) i  $x > 0$  (plavo). Dakle, čestice označene kao crvene imale su početni položaj  $x < 0$ , a čestice označene kao plave imale su početni položaj  $x > 0$ . Prva Poenkareova sekcija, najdaljenija na levo na slici 4.7 a i slici 4.7 b jasno ukazuje koje čestice na početku se nalaze na koordinatama  $x < 0$ . Pošto čestice počinju da prate polje brzina, oni počinju da se mešaju. Do kraja mešalice, čestice nisu potpuno izmešane - još uvek postoje značajni džepovi samo crvenih i samo plavih čestica.



Slika 4.7: Poenkareove mape trajektorija čestica u različitim Poenkareovim presecima, a) 3-segmenta Ross konfiguracija i b) 3-segmenta Komax konfiguracija.

#### 4.2.2. Eksperimentalno određivanje homogenosti mešavine kuglica zeolita nakon mešanja u statičkoj mešalici tipa Ross i Komax

Na slici 4.8 su predstavljeni eksperimentalni rezultati prolaska materijala kroz mešalicu tipa Ross sa a) jednim elementom, b) sa dva elementa i c) sa tri elementa. Kvalitet mešanje se poboljšava duž mešalice, kao što je prikazano na slici 4.8. Na slici 4.8. se vizuelno jasno vide razlike između umešanosti kuglica zeolita plave i crvene boje. Primećuje se veliko odvajanje čestica u slučaju da je mešanje vršeno samo sa jednim segmentom, dok se umešanost materijala znatno poboljšava nakon prolaska kroz tri segmenta.



Slika 4.8. Eksperimentalni rezultati, slike preseka nakon prolaska materijala kroz mešalicu tipa Ross sa a) jednim elementom, b) sa dva elementa i c) sa tri elementa

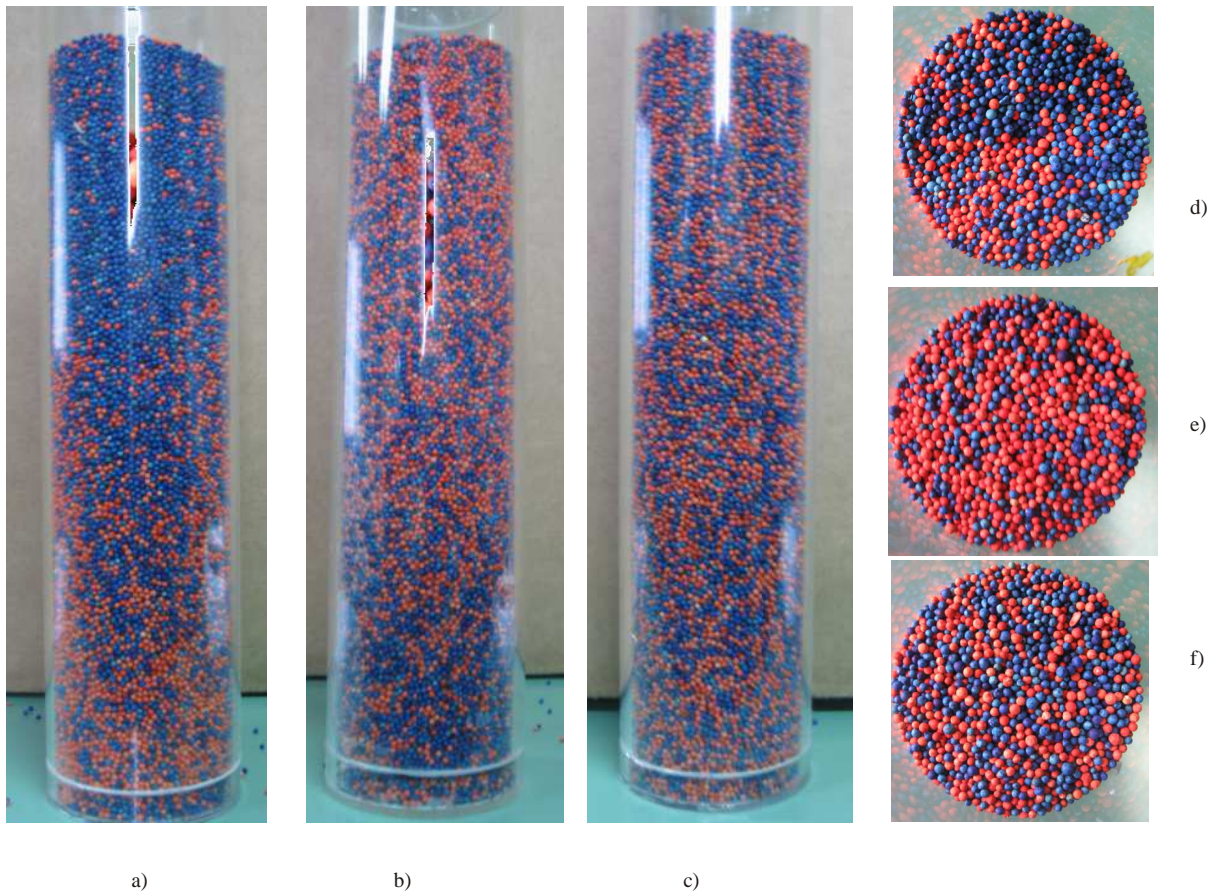
Aparatura koja je korišćena za eksperiment prikazana je na slici 4.9. U pitanju je statička mešalica tipa Komax.





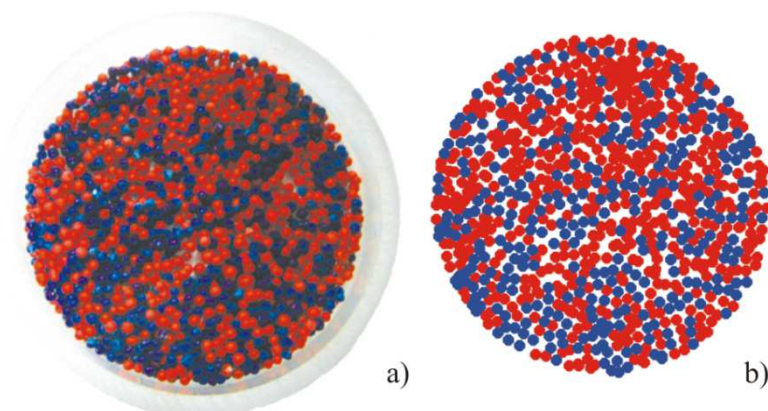
Slika 4.9. Fotografija statička mešalica tipa Komax koji je korišćen u eksperimentu

Na slici 4.10 prikazane su fotografije karakterističnih preseka i pogleda sa strane na prihvatnu komoru zeolita posle jednog, dva i tri prolaza kuglica kroz statičku mešalicu koja se sastoji od tri komore. Na slici 4.10. se vizuelno jasno vide razlike između umešanosti kuglica zeolita plave i crvene boje. Primećuje se veliko odvajanje čestica u slučaju da je mešanje vršeno samo sa jednim prolazom kroz statički mikser, dok se umešanost materijala znatno poboljšava nakon dva odnosno tri prolaza.



Slika 4.10. a) Eksperimentalni rezultati nakon prolaska kroz statičku mešalicu, a) jedanput, b) dva puta i c) nakon tri prolaza

Slika 4.11 prikazuje rezultate eksperimenta mešanja za tro-segmentnu Ross konfiguraciju. Aproksimacija eksperimentalnih rezultata je neophodna da bi se uporedili eksperimentalna rezultata i rezultate matematičkog modelovanja. Originalni računarski kod je razvijen za ovu primenu, kao što je to opisano u poglavlju 3.3.



Slika 4.11. Rezultat mešanja u tro-segmentnoj Ross konfiguraciji a) eksperimentalno, b) obrađena fotografija

Geometrija mešalice utiče na proces mešanja. Optimizacija procesa mešanja u ovom radu je rađena za različite konfiguracije mešalice, Ross i Komax, sa ili bez razdelnika. Proces mešanja zavisi od nekoliko parametara. Trajektorija utiče na kvalitet mešanja. Sa dužom putanjom čestice poboljšava se kvalitet procesa mešanja, ali je predugim mešanjem mogu da se izazovu deformacije čestice i da dođe do razmešavanja, čime će se dobiti lošiji kvalitet mešanja. Veoma je važno da se pronađu optimalni parametri procesa mešanja. Putanja čestica se povećava dodavanjem jednog ili više elemenata mešanje, a numerička simulacija može da se koristi za ove proračune, kao moćan alat za traženje optimalne geometrije mešalice. Srednje dužine trajektorije za tro-segmentne Komax i Ross konfiguracije, bez pregradom, na osnovu numeričke simulacije iznosile su: 436 i 430 mm, respektivno.

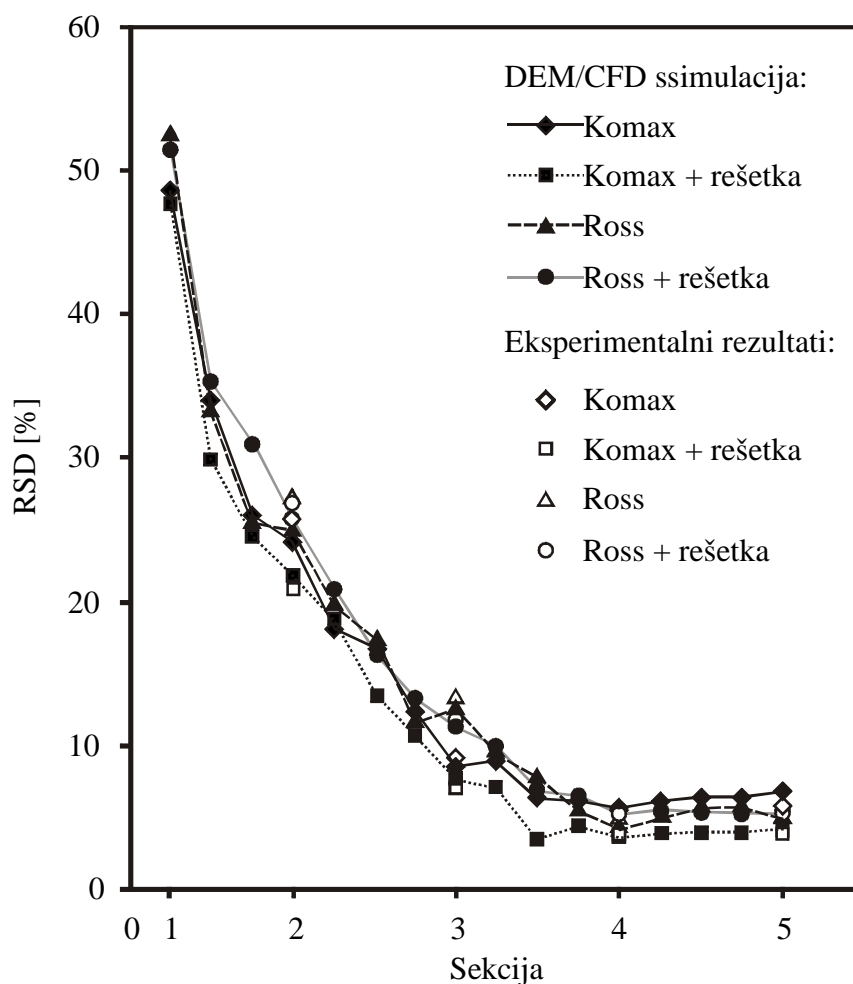
Stepen mešanja i vreme koje je potrebno da se postigne prihvatljivi kvalitet mešavine može se predvideti korišćenjem ovde predstavljenog kombinovanog DEM / CFD algoritme i eksperimentalnih merenja. U literaturi je predloženo nekoliko indeksa da bi se procenio stepen homogenosti smeše [Lemieux, 2008, Poux, 1991]. U ovom radu korišćena je relativna standardna devijacija (RSD) za praćenje kvaliteta mešanja u toku procesa mešanja i na kraju mešanja. RSD je dobro poznat kriterijum kvaliteta mešanja u farmaceutskoj industriji, i definisan je kao:

$$RSD = \frac{\sigma}{\bar{x}} \cdot 100\% , \quad \sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^M (\bar{x} - x_i)^2}{M - 1}} , \quad (4.1)$$

gde je:  $M$  broj uzoraka,  $x_i$  koncentracija uzorka  $i$  i  $\bar{x}$  prosečna koncentracija svih uzoraka.

Rezultati numeričke simulacije i eksperimentalnih procesa mešanja su predstavljeni na slici 4.13. Mešanje počinje nakon što čestice napuste gornji segment, između 0 i 1 sekcije na slici 4.13 (čim se ukloni mobilni zatvarač, omogućavajući da granula pada ka statičkoj mešalici). Čestice se brzo mešaju u prvom delu, kao što se vidi iz slici, da bi se dostigao stepen mešanja od 20-27% na izlazu. Elementi za mešanje tipa Komax pokazuju bolje rezultate mešanja u ovom odeljku (20-22%, za DEM/CFD simulaciju, kao i za eksperimentalne rezultate) u odnosu na Ross (24-27%), što je i bilo za očekivanje zbog geometrijski zakrivljenih površina. Komax elemenati za mešanje bio je efikasniji i nakon drugog i trećeg segmenta, postigavši kvalitet mešanja od 6-8% i 4-5% na izlazu, dok je kvalitet mešanja za Ross konfiguracije bio svega 11-13% i 5-6% na izlazu. Mali, ali stabilan pad u kvalitetu mešanje se primećuje i za Komax i Ros mešalice na DEM / CFD simulaciji, što se može videti na slici. 4.13 (između segmenata 4 i 5). Do ovoga dolazi usled dejstva

centrifugalne sile koja utiče na kretanje granula koje izlaze iz mešalice. Smanjenje kvaliteta mešanja je još očiglednije u Komax konfiguraciji, kao što se vidi na slici. 4.12, zbog specifične geometrije ovih elemenata za mešanje. Upotrebom pregrade sa kvadratnim otvorima omogućava se da kvalitet mešanja ostane stalan nakon što granule napuste treći element za mešanje.

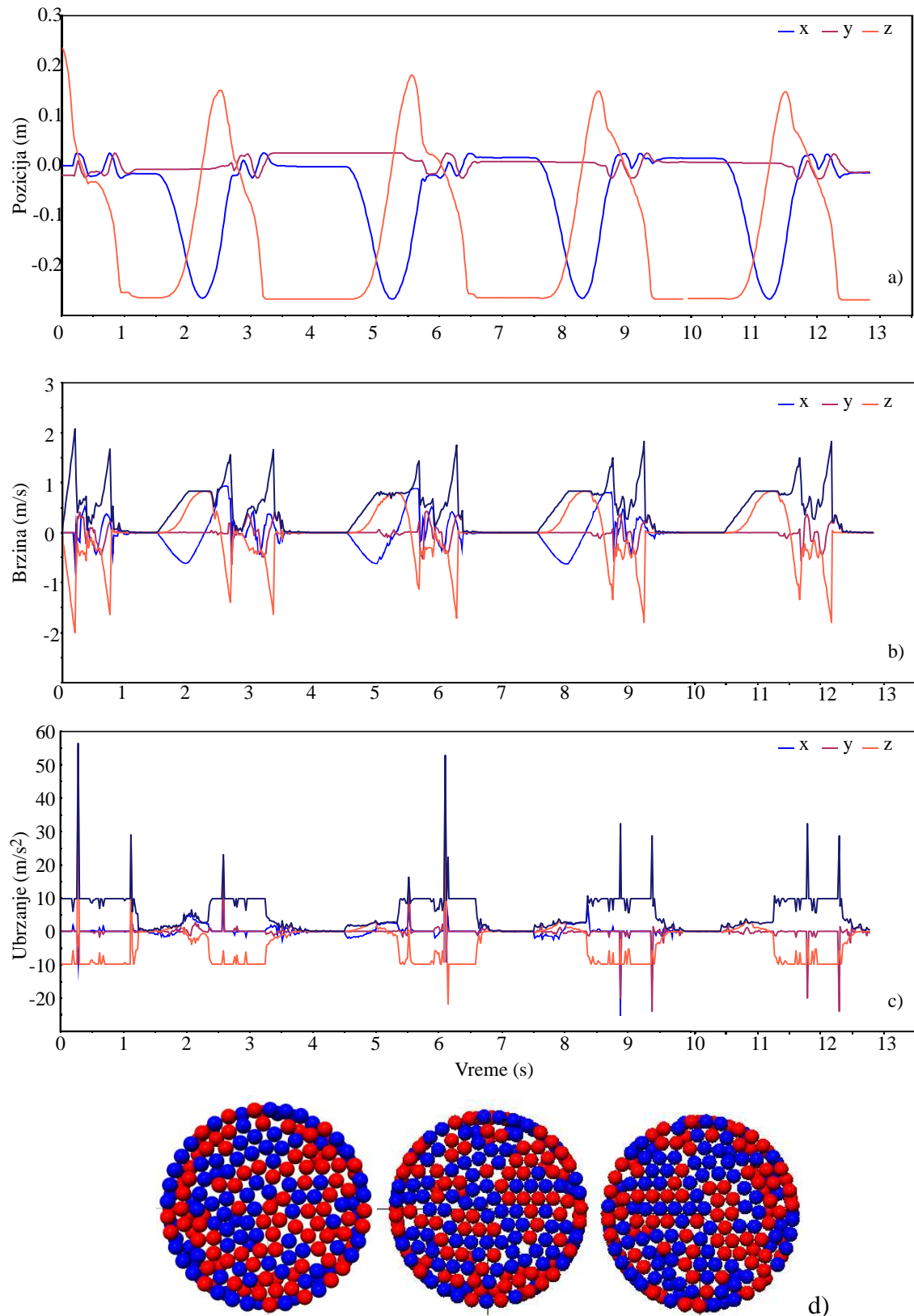


Slika 4.12. RSD kriterijum za mešanje Ross i Komax mešalice

Generalno, Komax mešalice su pokazale bolje rezultate pri mešanju, u odnosu na Ross, ali kompleksnost Komax geometrije podrazumeva da ju je teže napraviti. Komax je primenljiv kada visina instalacija mora biti niska, ali je upotreba Ross mešalice finansijski prihvatljivija. Upotreba pregrada sa rupama kvadratnog preseka je preporučljiva, da bi se smanjilo odvajanje (segregacija) granula.

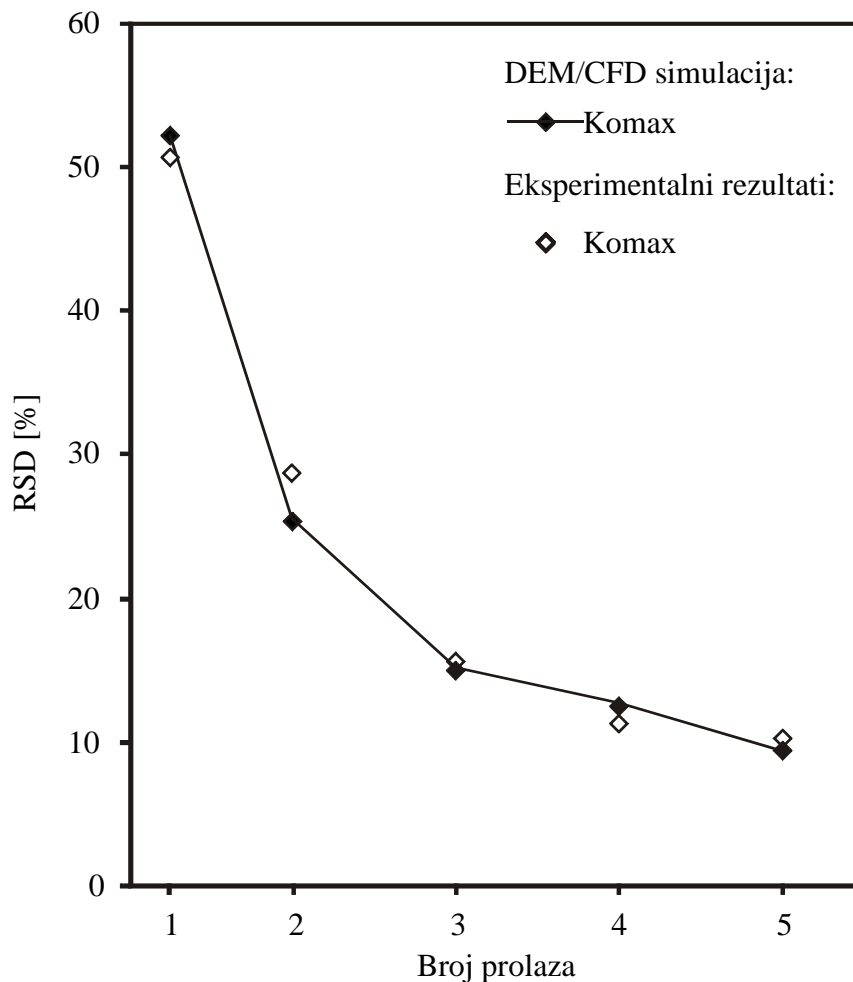
#### **4.2.3. DEM simulacije mešanja granula zeolita u statičkoj mešalici tipa obrtni Komax**

Statička mešalica tipa obrtni Komax koji se koristi u ovoj disertaciji se sastoji od tri elementa. Obrtna mešalica tipa Komax podrazumeva da se u toku procesa mešanja čestica vrši obrtanje cele statičke mešalice za  $180^{\circ}$  u odnosu na vertikalnu osu mešalice. U ovom slučaju se obratnje vršilo pet puta, a moguće je menjati broj obrtanja u cilju optimizacije procesa mešanja. Poređenje rezultata mešanja u zavisnosti od broja obratanja mešalice se najjednostavnije može obaviti primenom numeričke simulacije, tj. DEM analize. Na slici 4.13 su prikazani grafički rezultati DEM simulacije za obrtni Komax koji se sastoji od tri elementa.



Slika 4.13. a) x, y i z projekcije trajektorije jedne izdvojene čestice tokom procesa mešanja, b) brzine u x, y i z pravcu, c) projekcije ubrzanja u x, y i z pravcu i d) Položaj crvenih i plavih čestica nakon jednog, dva i tri rotacije mešalice.

Na slici 4.14 je predstavljena geometrija modela za obrtnu mešalicu tipa Komax (a), trajektorije proizvoljno izabrane čestice tokom vremena (b) i rezultat mešanja nakon prvog, drugog i trećeg obrta mešalice (c).



Slika 4.14. Zavisnost RSD kriterijuma od broja prolaza kroz rotacionu statičku mešalicu

Na slici 4,15 prikazana je zavisnost vrednosti koeficijenta varijacije od broja prolaza kroz rotacionu statičku mešalicu. Može se videti da se koeficijent varijacije smanjuje sa povećanjem broja prolaza kroz statičku mešalicu. Ovo znači da materijal postaje homogeniji sa povećanjem vremena mešanja. Međutim, uočava se da RSD nije dostigao vrednost ispod 10%, što znači da homogenost mešavine nije na zadovoljavajućem nivou.

#### 4.2.4. Eksperimentalni rezultati ispitivanja homogenosti samlevene kukuruzne prekrupe u statičkoj mešalici tipa Komax

##### 4.2.4.1. Rezultati za odnos mešanja 1:10.000

U ovom poglavlju su dati rezultati ispitivanja homogenosti samlevene kukuruzne prekrupe za jedan, tri i pet prolaza kroz statičku mešalicu tipa Komax sa tri elementa. Isti uslovi su korišćeni i za eksperiment sa zeolitom.

U eksperimentu je korišćen samlevena kukuruzna prekrupa na situ otvora od 3 mm, a masa materijala koja je propuštana kroz statičku mešalicu iznosila je 15 kg.

Rezultati ispitivanja homogenosti samlevene kukuruzne prekrupe nakon jednog prolaza kroz statičku mešalicu, dobijeni spektrofotometrijskim određivanjem sadržaja Microtracer-a, dati su u tabeli 4.2. 1.

Tabela 4.2.1. Homogenost mešavine samlevene kukuruzne prekrupe pri prolasku kroz statičku mešalicu tipa Komax za odnos mešanja 1:10.000, granulacije 3 mm, nakon jednog propuštanja

Uzorak	Masa	masa posude	Ukupno	A 100g
1	93,42	26,28	67,14	0,080
2	103,32	29,24	74,08	0,107
3	87,63	26,68	60,95	0,195
4	112,86	27,58	85,28	0,096
5	100,68	26,45	74,23	0,105
6	107,92	26,42	81,5	0,713
7	109,11	26,5	82,61	0,484
8	106,8	30,25	76,55	0,816
9	95,64	27,63	68,01	0,322
10	116,05	26,48	89,57	1,764
Sred.vred.				0,562
sd				0,555
RSD (%)				98,755



Rezultati ispitivanja homogenosti samlevene kukuruzne prekrupe nakon jednostrukog prolaza kroz statičku mešalicu pokazuju da nije postignuta zadovoljavajuća homogenost materijala, jer je vrednost RSD vrednost od 98,75 % mnogo veća od preporučene vrednosti za kompletne smeše za ishranu životinja po Pravilniku o kvalitetu hrane za životinje (Sl. list RS, 4/2010), koja treba da je manja od 10%.

Tabela 4.2.2. Homogenost mešavine samlevene kukuruzne prekrupe pri prolasku kroz statičku mešalicu tipa Komax za odnos mešanja 1:10.000, granulacije 3 mm, nakon tri propuštanja

Uzorak	Masa	masa posude	Ukupno	A 100g
1	90,39	26,42	63,97	1,139
2	98,72	26,57	72,15	1,059
3	94,54	26,64	67,9	0,975
4	98,48	27,66	70,82	0,976
5	99,35	30,2	69,15	1,458
6	97,31	26,5	70,81	0,748
7	98,28	27,38	70,9	0,903
8	97,63	28,53	69,1	0,777
9	104,04	28,4	75,64	0,750
10	113,67	29,1	84,57	0,643
Sred.vred.				0,904
sd				0,253
RSD(%)				28,021

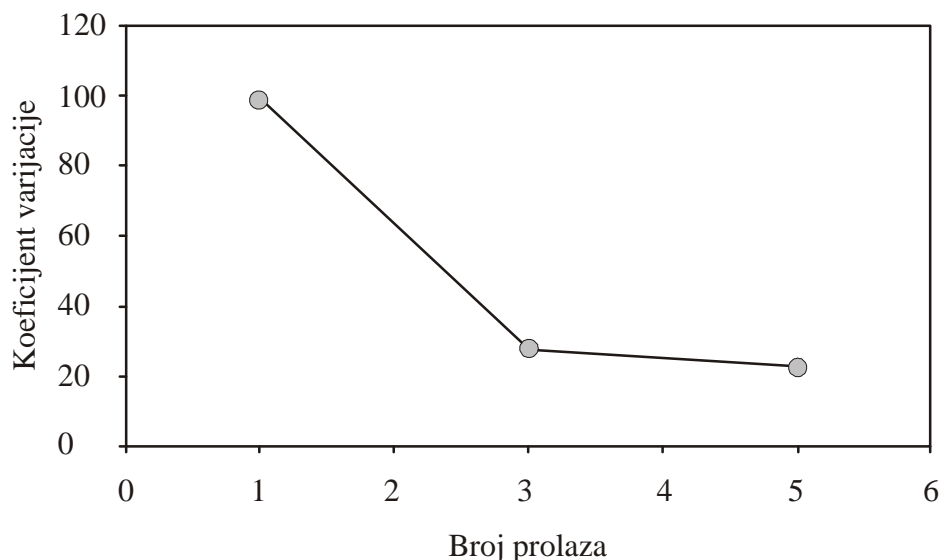
Tabela 4.2.3. Homogenost mešavine samlevene kukuruzne prekrupe pri prolasku kroz statičku mešalicu tipa Komax za odnos mešanja 1:10.000, granulacije 3 mm, nakon pet propuštanja

Uzorak	Masa	masa posude	Ukupno	A 100g
1	102,8	26,58	76,22	1,116
2	91,78	26,51	65,27	1,043
3	112,24	28,34	83,9	1,138
4	113,32	28,43	84,89	1,029
5	110,78	26,7	84,08	1,092
6	93,75	27,4	66,35	0,702
7	94,3	27,73	66,57	0,928
8	87,68	28,61	59,07	0,686
9	102,77	27,62	75,15	0,649
10	94,15	27,39	66,76	0,753
Sred.vred.		27,78	73,35	0,872
sd				0,198
RSD(%)				22,694

Tabela 4.2.4. Zavisnost RSD vrednosti od broja prolaza kroz statičku mešalicu tipa Komax

Broj prolaza	1	3	5
RSD (%)	98,755	28,021	22,694

Iako rezultati ispitivanja homogenosti samlevene kukuruzne prekrupe nakon jednog, tri i pet prolaza kroz statičku mešalicu (tabela 4.2.4.) pokazuju da nije postignuta zadovoljavajuća homogenost materijala (RSD 28,021, odnosno 22,694 %), može se videti da se koeficijent varijacije smanjuje sa povećanjem broja prolaza materijala kroz statičku mešalicu. Na slici 4.15 prikazana je zavisnost vrednosti koeficijenta varijacije od broja prolaza kroz statičku mešalicu. Povećanjem broja prolaza kroz statičku mešalicu, što bi u praksi značilo povećanjem broja elemenata u mešalici, povećava se stepen umešanosti materijala. Može se videti da se koeficijent varijacije smanjuje sa povećanjem broja prolaza kroz statičku mešalicu.



Slika 4.15. Zavisnost vrednosti koeficijenta varijacije od broja propuštanja kroz statičku mešalicu

Iz rezultata prikazanih u tabeli 4.2.4, može se videti da dolazi do smanjenja koeficijenta varijacije sa povećanjem broja propuštanja kroz statičku mešalicu sačinjenu od tri Komax elementa. Međutim, iz predhodnog eksperimenta vidimo da se sa povećanjem broja propuštanja kroz statičku mešalicu može samo postići koeficijent varijacije oko 20% (22,694%), što je nedovoljno za odnos mešanja 1:10.000. Daljim povećanjem broja propuštanja, postavilo bi se pitanje ekonomske opravdanosti ovakvog procesa. U tom slučaju bi dužina statičku mešalicu bila velika, a samim time bi se značajno povećalo i vreme proticanja kroz mešalicu, pa se nameće pitanje ekonomske isplativosti samog procesa. Može se zaključiti da povećanje dimenzija statičke mešalice i povećanje vremena potrebnog za mešanje čestica u cilju dobijanja zadovoljavajućeg nivoa homogenosti nije ekonomski isplativo.

Zato se pristupa drugačijem načinu mešanja, kako bi se obezbedio zadovoljavajući stepen homogenosti, a smanjila cena procesa mešanja. Ovako nedovoljno izmešana masa dalje se meša u cilindričnoj mešalici, model SYTH0.25, slika 3.6.

Cilj ovog eksperimenta je da se utvrdi da li se unošenjem materijala, koji je prethodno propušten kroz statičku mešalicu, u cilindričnu mešalicu smanjuje vreme mešanja u poređenju materijalom koji nije prethodno mešan. Odnos mešanja za oba ova slučaja bio je takođe 1:10.000.

Vreme mešanja u cilindričnoj mešalici za slučaj kada materijal nije prethodno propušten kroz statičku mešalicu iznosilo je: 30 sekundi, 90 sekundi i 150 sekundi. Rezultati ispitivanja homogenosti materijala dobijeni spektrofotometrijskim određivanjem sadržaja Microtracer-a dati su u tabeli 4.3.

Tabela 4.3.1. Homogenost mešavine samlevene kukuruzne prekrupe pri mešanju u cilindričnoj mešalici za odnos mešanja 1:10.000, za 30 sekundi

Uzorak	Masa	masa posude	Ukupno	A 100g
1	90,22	33,41	56,81	0,785
2	87,67	35,18	52,49	0,775
3	92,27	36,8	55,47	0,916
4	71,69	33,15	38,54	0,755
5	105,31	35,78	69,53	0,936
6	82,15	33,24	48,91	0,900
7	85,85	35,17	50,68	0,989
8	82,02	36,97	45,05	0,957
Srednja vr.				0,876
sd				0,091
RSD(%)				10,382

Tabela 4.3.2. Homogenost mešavine samlevene kukuruzne prekrupe pri mešanju u cilindričnoj mešalici za odnos mešanja 1:10.000, za 90 sekundi

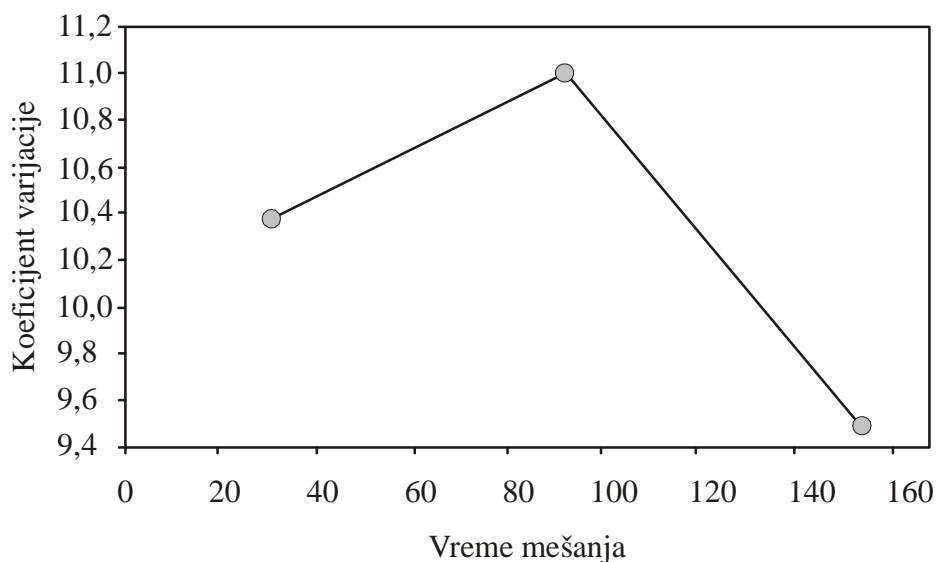
Uzorak	Masa	masa posude	Ukupno	A 100g
1	97,64	37	60,64	0,806
2	91,04	34,08	56,96	0,818
3	75,05	33,13	41,92	0,823
4	97,12	34,23	62,89	0,954
5	93,63	33,42	60,21	0,792
6	102,2	33,3	68,9	0,746
7	86,36	33,28	53,08	0,676
8	106,9	33,35	73,55	0,696
Srednja vr.				0,789
sd				0,0868
RSD(%)				10,999

Tabela 4.3.3. Homogenost mešavine samlevene kukuruzne prekrupe pri mešanju u cilindričnoj mešalici za odnos mešanja 1:10.000, za 150 sekundi

Uzorak	Masa	masa posude	Ukupno	A 100g
1	96,09	35,3	60,79	0,808
2	95,14	33,2	61,94	0,812
3	100,4	34,2	66,2	0,810
4	88,17	34,35	53,82	0,831
5	107,74	34,21	73,53	0,762
6	115	33,37	81,63	0,838
7	101,28	32,88	68,4	0,784
8	121,21	33,36	87,85	0,608
Srednja vr.				0,78
sd				0,074
RSD(%)				9,498

Tabela 4.3.4. Zavisnost RSD u rotacionoj cilindričnoj mešalici od vremena mešanja

	30 s	90 s	150 s
RSD (%)	10,382	10,992	9,498



Slika 4.16. Koficijent varijacije u zavisnosti od vremena mešanja u cilindričnoj mešalici.

Iz rezultata ispitivanja homogenosti materijala izmešanog u cilindričnoj mešalici, bez prethodnog propuštanja kroz statičku mešalicu, može se videti da je za sva tri vremena mešanja RSD iznosio oko 10 %. Za vremena mešanja od 30, odnosno 90 sekundi, nije postignuta homogenost propisana Pravilnikom o kvalitetu hrane za životinje (Sl. list RS, 4/2010), dok je za vreme mešanja od 150 sekundi postignut odgovarajući stepen umešanosti materijala (RSD < 10%).

Na slici 4.16 prikazana je zavisnost vrednosti koeficijenta varijacije i vremena mešanja.

U eksperimentu u cilindričnu mešalicu se unosi material koji je prošao kroz statičku Komox mešalicu pri pet prolazaka (broj prolazaka je određen na osnovu eksperimenta sa kukuruznom prekrupom, a bez naknadnog mešanja u cilindričnoj mešalici). Vreme mešanja u ovom eksperimentu bilo je 15 sekundi, 45 sekundi i 75 sekundi, što je upola manje vremena mešanja u prethodnom eksperimentu.

Rezultati ispitivanja dobijeni spektrofotometrijskim određivanjem sadržaja Microtracer-a dati su u tabeli 4.4.

Tabela 4.4.1 Homogenost mešavine samlevene kukuruzne prekrupe pri mešanju u cilindričnoj mešalici za odnos mešanja 1:10.000, za 15 sekundi, sa materijalom koji je predhodno propušten kroz Komax statičku mešalicu.

Uzorak	Masa	masa posude	Ukupno	A 100g
1	83,98	33,34	50,64	0,523
2	107,06	32,96	74,10	0,677
3	106,79	36,86	69,93	0,664
4	81,76	32,24	49,52	0,743
5	88,63	33,97	54,66	0,679
6	98,34	33,74	64,60	0,678
7	95,05	33,76	61,29	0,718
8	88,98	32,88	56,10	0,656
Srednja vr.				0,667
sd				0,065
RSD(%)				9,735

Tabela 4.4.2. Homogenost mešavine samlevene kukuruzne prekrupe pri mešanju u cilindričnoj mešalici za odnos mešanja 1:10.000, za 45 sekundi sa materijalom koji je predhodno propušten kroz Komax statičku mešalicu.

Uzorak	Masa	masa posude	Ukupno	A 100g
1	112,71	32,27	80,44	0,634
2	87,65	35,84	51,81	0,627
3	105,65	32,91	72,74	0,634
4	90,65	34,61	56,04	0,648
5	84,09	32,96	51,13	0,538
6	121,98	32,78	89,2	0,676
7	101,61	32,01	69,6	0,661
8	85,37	32,02	53,35	0,643
Srednja vr.				0,633
sd				0,042
RSD(%)				6,554



Tabela 4.4.3. Homogenost mešavine samlevene kukuruzne prekrupe pri mešanju u cilindričnoj mešalici za odnos mešanja 1:10.000, za 75 sekundi sa materijalom koji je prethodno propušten kroz Komax statičku mešalicu.

Uzorak	Masa	masa posude	Ukupno	A 100g
1	112,71	32,27	80,44	0,634
2	87,65	35,84	51,81	0,627
3	105,65	32,91	72,74	0,634
4	90,65	34,61	56,04	0,648
5	84,09	32,96	51,13	0,538
6	121,98	32,78	89,2	0,676
7	101,61	32,01	69,6	0,661
8	85,37	32,02	53,35	0,643
Srednja vr.				0,633
sd				0,041
RSD(%)				6,554

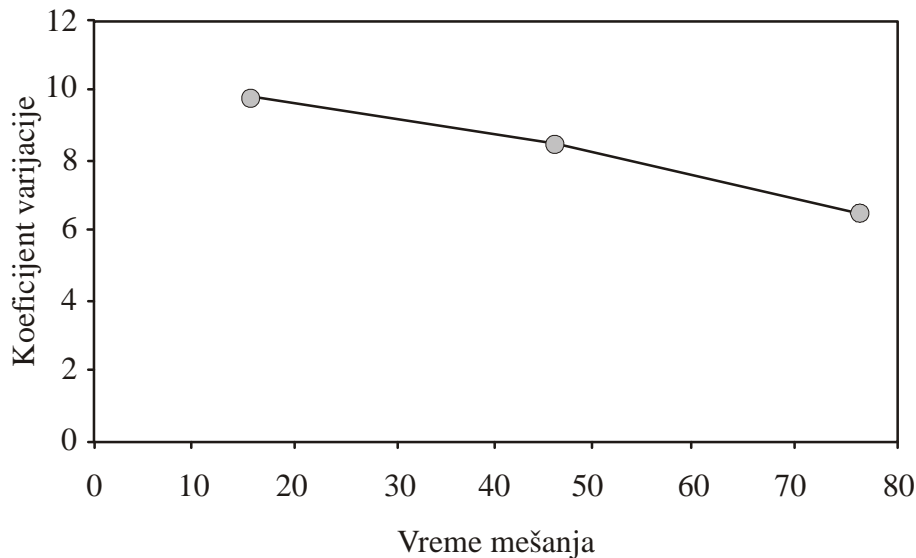
Tabela 4.4.4. Zavisnost koeficijenta varijacije od vremena mešanja u cilindričnoj mešalici nakon predmešanja u Komax statičkoj mešalici

Vreme mešanja	15 s	45 s	75 s
RSD (%)	9,735	8,444	6,554

Rezultati ovog ispitivanja pokazuju da se sa povećanjem vremena mešanja povećava stepen umešanosti materijala (RSD se sa 9,73 % za 15 sekundi mešanja smanjio na 6,55 % za 75 sekundi mešanja). Za sva 3 vremena mešanja, ako je vreme mešanja bilo duplo kraće nego u prethodnom eksperimentu, RSD je bio manji u poređenju sa mešanjem bez prethodnog propuštanja materijala kroz statičku mešalicu. Takođe, za sva tri vremena mešanja postignuta je homogenost smeše koja je u skladu sa zahtevima Pravilnika o kvalitetu hrane za životinje (Sl. list RS, 4/2010), tj. RSD je bio manji od 10%, dok je u prethodnom eksperimentu

odgovaraćuća homogenost smeše postignuta tek nakon 150 s. Na osnovu ovakvih rezultata, može se zaključiti da je potrebno mnogo manje angažovanje mešalice, pa samim tim postoji mogućnost za uštedu energije i skraćivanje vremena mešanja.

Na slici 4.17 prikazana je zavisnost vrednosti koeficijenta varijacije od vremena mešanja dobijena eksperimentalnim putem. Može se zaključiti da se sa povećanjem vremena mešanja koeficijent varijacije smanjuje.



Slika 4.17. Zavisnost koeficijenta varijacije od vremena mešanja

### 4.3. DEM analiza kretanja kuglica zeolita u modifikovanim pužnim transporterima

Na osnovu DEM analize, ispitivan je uticaj modifikovane geometrije zavojnice pužnog transportera na kretanje čestice, i putanje čestica. DEM analiza se primenjuje da bi se otkrio međusobni uticaj različitih dizajna modifikovanih pužnih geometrija i posmatranih veličina i oblika čestice na mogućnost produžavanja putanje čestice u toku transporta. Analiza počinje u trenutku kada je sferna čestica ulazi u pužni transporter, a kraj putanje je u trenutku kada čestica napusti transporter. Putanja jedne čestice za rotacioni mlin je analizirana u *Cleary, 2006*.

U cilju skraćivanja računarske simulaciju i vremena korišćenja centralne procesorske jedinice (engl. central processing unit, CPU), kao i smanjenja potrebnih računarskih resursa (kao što je količina RAM memorije, performanse matična ploča, i / ili uz podršku multi procesorskom radnom okruženju, itd) bilo je neophodno postaviti neke osnovne pretpostavke.

U ovom radu je prvo ispitan puž sa konstantnim korakom zavojnice, bez dodatnih spirala, slika 3.12 a. Ova vrsta pužnih transporterata se najčešće koristi u procesnoj industriji. Puž sa konstantnim korakom zavojnice ima korak jednak spoljašnjem prečniku cevi. DEM model puža je pojednostavljen (kako bi se značajno smanjilo procesorsko vreme) primenom periodičnih graničnih uslove na korak puža. Geometrijske karakteristike pužnog transporterata date su u tabeli 3.3.

Čestice za DEM analizu su modelovane kao sfere i urađena je analiza u trodimenzionalnom Kartenzijevom prostoru. Parametri koji se koriste za analizu DEM dati su u tabeli 3.2. Simulacija je rađena za 10.000 čestica, gustine  $500 \text{ kg/m}^3$  i prečnika 4 mm. Maksimalna preklapanja čestice i granica određuje normalnom krutosti opruge koja se koristi za određivanje sile udara.

Numerički eksperimenti zasnovani su na DEM simulacijama i obavljani su za različite geometrije pužnih transporterata, slika 3.12. Puž sa konstantnim korakom zavojnice upoređen je sa modifikovanim pužnim transporterima sa dodatnim zavojnicama zavarenim na periferiji spirale puža u cilju poboljšanja mešanja tokom transporta. Ispitivani modifikovani puževi sa konstantnim korakom koji se koriste u ovoj disertaciji su:

1. modifikovani pužni transporter sa tri dodatne zavojnice orijentisane u istom smeru kao i spirala puža,
2. modifikovani pužni transporter sa tri dodatne zavojnice orijentisane u suprotnom smeru od spirale puža,
3. modifikovani pužni transporter sa tri skraćene dodatne zavojnice orijentisane u suprotnom smeru od spirale puža i
4. modifikovani pužni transporter sa tri dodatne pravolinijske lopatice.

U daljem tekstu biće prikazani rezultati DEM simulacije za modifikovani pužni transporter sa tri dodatne zavojnice orijentisane u istom smeru kao i spirala puža, za dužinu puža  $L=400 \text{ mm}$ .

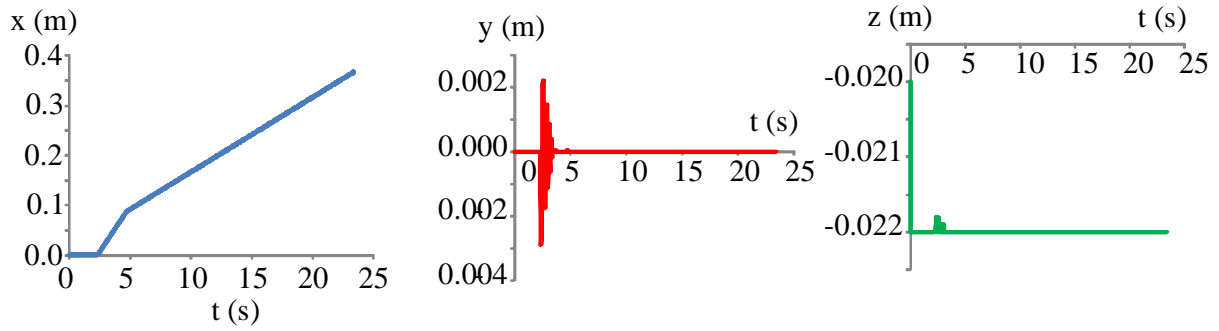
Rezultati simulacije dati su u obliku datoteke za svaki trenutni položaj proizvoljno izdvojene uočene čestice sa priraštajem vremena od 0,02s.

Tabela 4.5. Vrednosti kordinata položaja centralne tačke uočene čestice za prirašaj vremena od 1s od trenutka ulaska do trenutka izlaska iz puža

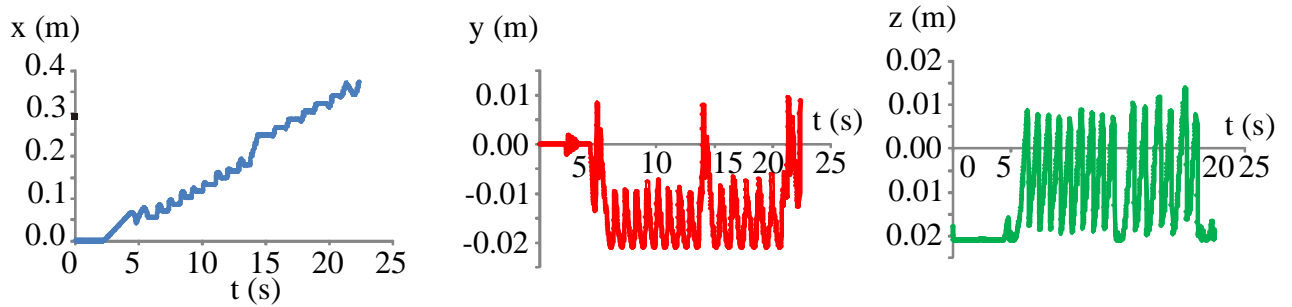
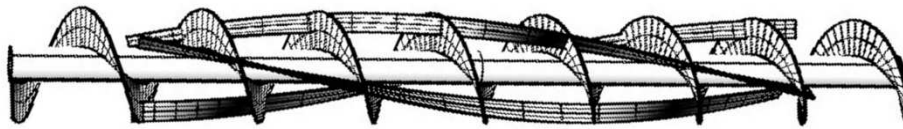
t(s)	x(m)	y(m)	z(m)
0	0,002	0,01	-0,005
1	0,000262	0,009386	-0,01982
2	0,000262	0,007474	-0,02067
3	0,000262	-0,02204	7,38E-05
4	0,000351	-0,01458	-0,01654
5	0,001495	-0,00408	-0,02169
6	0,038505	0,002524	-0,02181
7	0,068093	-0,01816	-0,01243
8	0,086179	-0,01554	-0,01559
9	0,104489	-0,0122	-0,01831
10	0,116729	-0,0099	-0,01966
11	0,123246	-0,00849	-0,02033
12	0,137204	-0,00524	-0,02142
13	0,157285	-0,00936	0,004821
14	0,176985	-0,01981	0,007349
15	0,195299	-0,0217	0,003651
16	0,213638	-0,02196	-0,00074
17	0,23167	-0,02148	-0,00465
18	0,249847	-0,02012	-0,0088
19	0,268048	-0,01825	-0,01233
20	0,286219	-0,01539	-0,01562
21	0,304418	-0,01233	-0,01813
22	0,316798	-0,00977	-0,0198
23	0,324257	-0,00812	-0,02039
24	0,336034	-0,00915	-0,02007
25	0,352313	-0,00157	-0,02189

Korišćenjem numeričkih podataka dobijeni su sledeći dijagrami, slika 4.19 pozicija tačke uočene čestice pri kretanju kroz puž-projekcije,  $x(t)$ ,  $y(t)$  i  $z(t)$ :

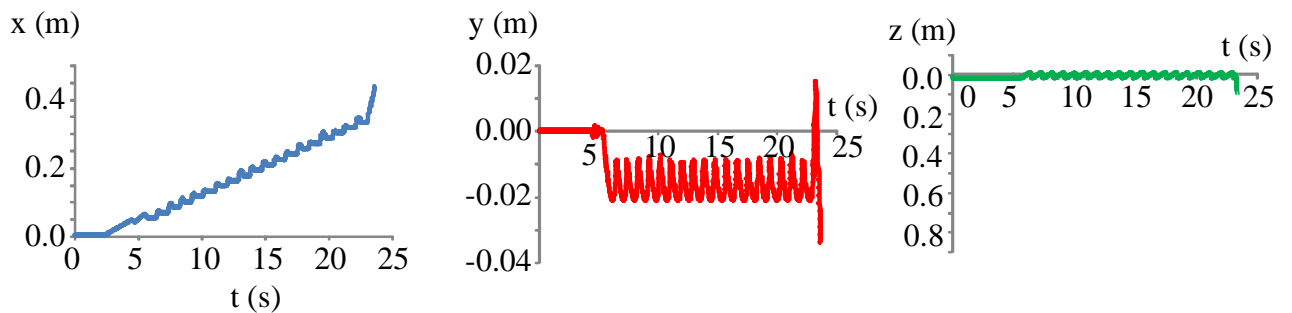
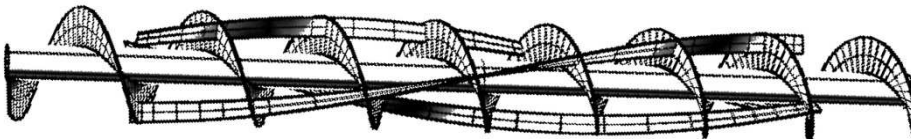
Spajanjem prostornih tačaka položaja čestice dobijamo crtež trajektorije uočene čestice, slika 4.18.



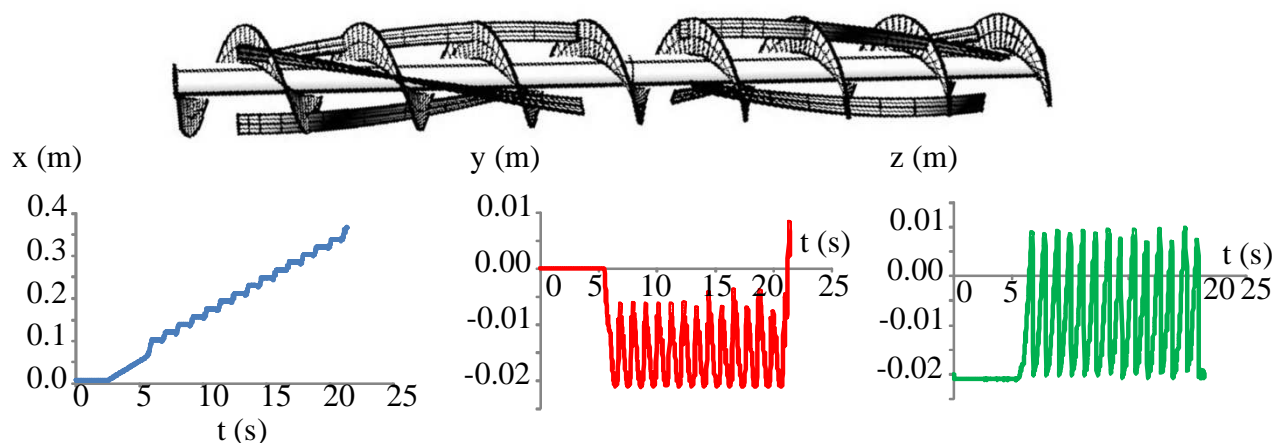
Slika 4.18. Puž sa konstantnim korakom zavojnice, promene Kartenzijevih koordinata tačke tokom vremena



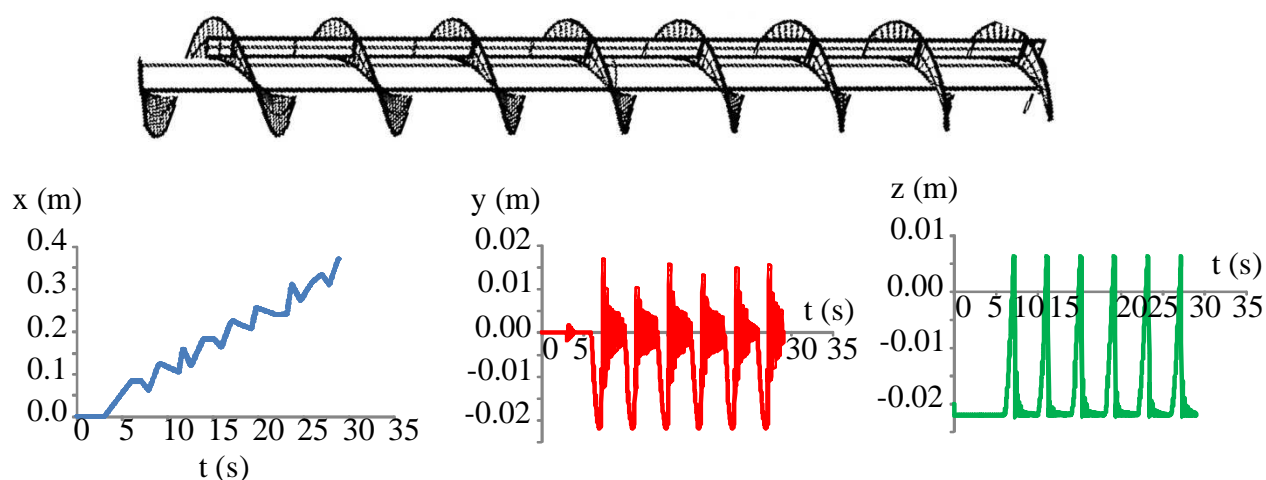
Slika 4.19. Modifikovanog pužni transporter sa tri dodatne zavojnice orijentisane u istom smeru kao i spirala puža, promene Kartenzijevih koordinata tačke tokom vremena



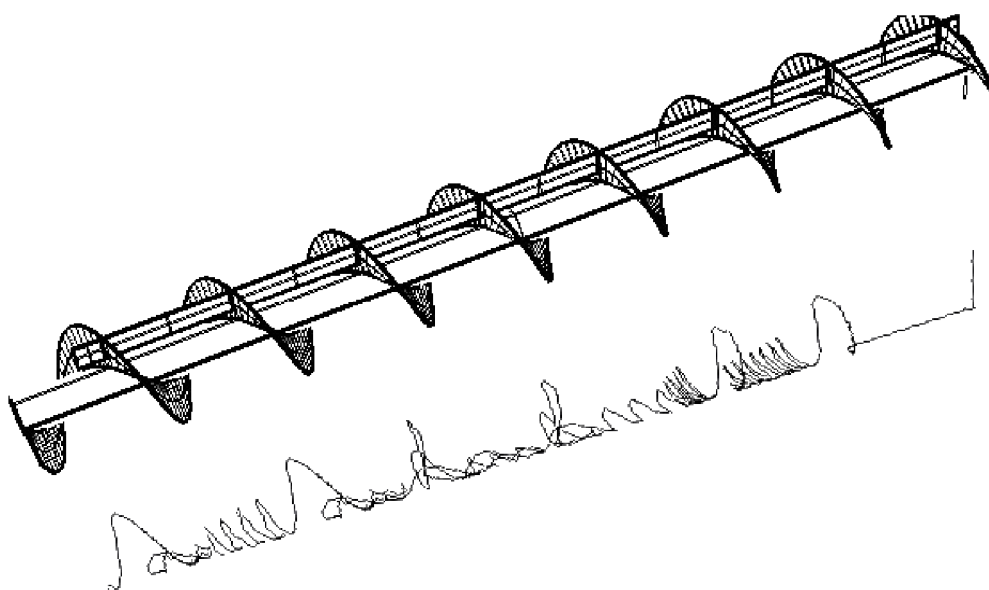
Slika 4.20 Modifikovani pužni transporter sa tri dodatne zavojnice orijentisane u suprotnom smeru od spirale puža, promene Kartenzijevih koordinata tačke tokom vremena



Slika 4.21. Modifikovani pužni transporter sa tri skraćene zavojnice orijentisane u suprotnom smeru od spirale puža, promene Kartenzijevih koordinata tačke tokom vremena

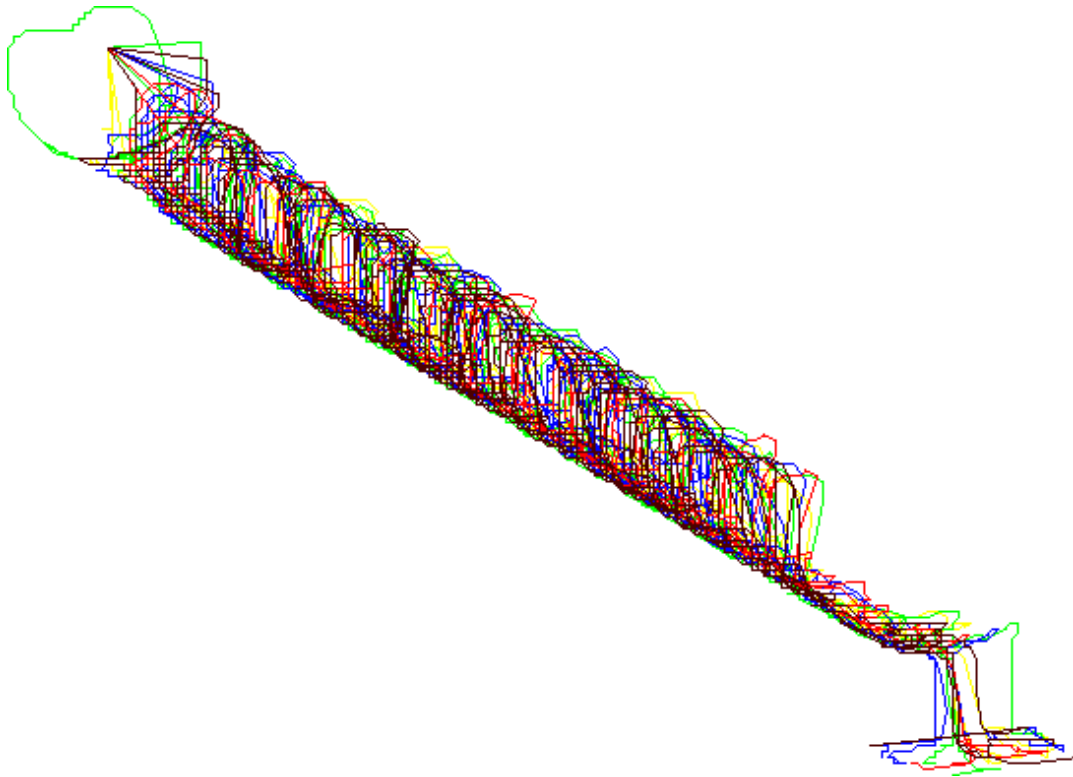


Slika 4.22. Modifikovani pužni transporter sa tri dodatne pravolinijske lopatice, promene Kartenzijevih koordinata tačke tokom vremena



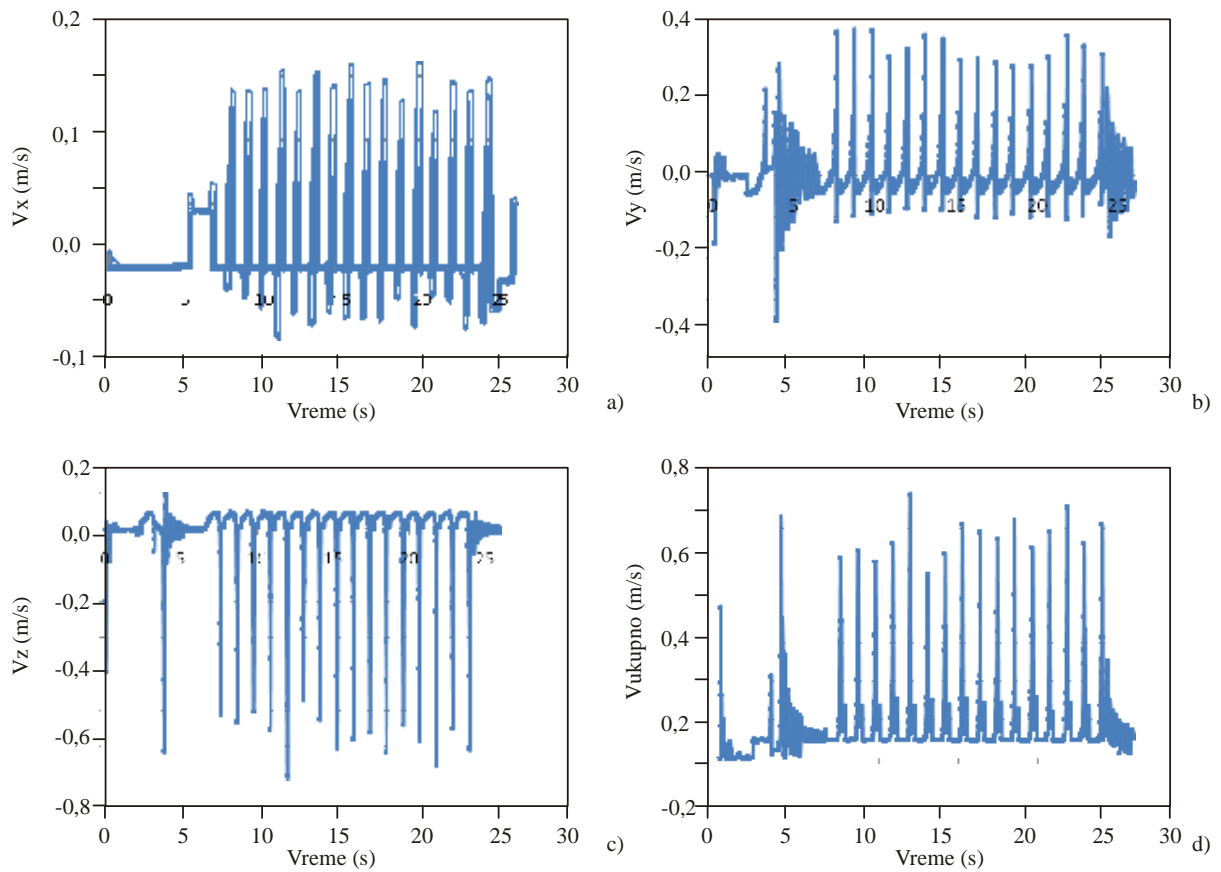
Slika 4.23. Trajektorija uočene čestice od trenutka ulaska do trenutka napuštanja puža

Na isti način dobijaju se trajektorije svih čestica koje se kreću kroz puž i međusobno deluju jedna na drugu a slici 4.24 su prikazane trajektorije proizvoljno izabranih 25 čestica.



Slika 4.24. Trajektorija više uočene čestice od trenutka ulaska do trenutka napuštanja puža  
Integraljenjem dobijenih putanja izračunavamo dužinu pređenog puta čestice pri kretanju kroz puž. Na osnovu ovog podatka je moguće analizirati uticaj dužine putanje na kvalitet procesa mešanja.

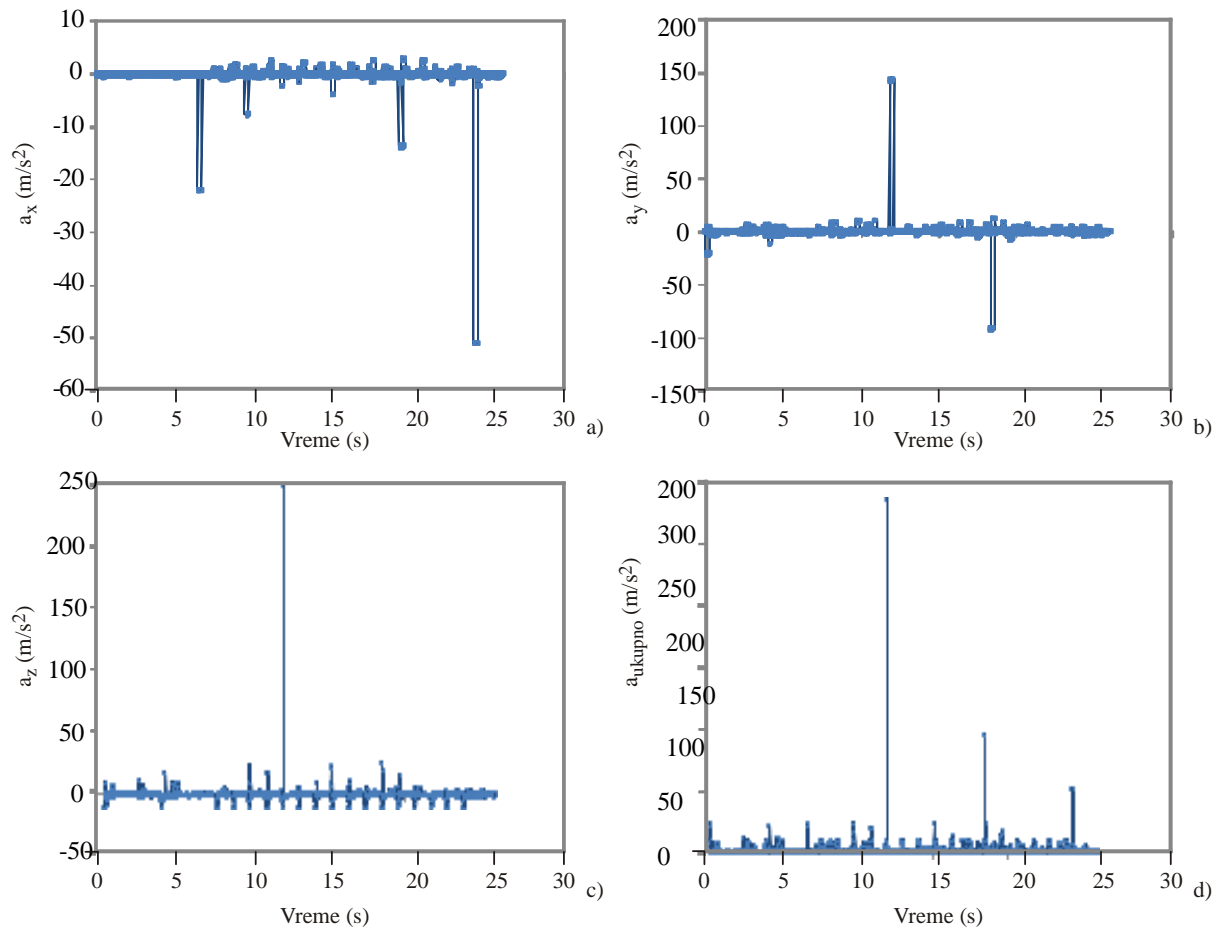
Korišćenjem numeričkih podataka dobijeni su sledeći dijagrami: Brzina težišne tačke uočene čestice pri kretanju kroz puž-projeksije,  $V_x(t)$ ,  $V_x(t)$ ,  $V_z(t)$  i  $V(t)$ .



Slika 4.25. Brzina čestice (m/s) tokom kretanja kroz puž-projeksija a)u pravcu ose x, b)u pravcu ose y, c)u pravcu ose z d) zbirna

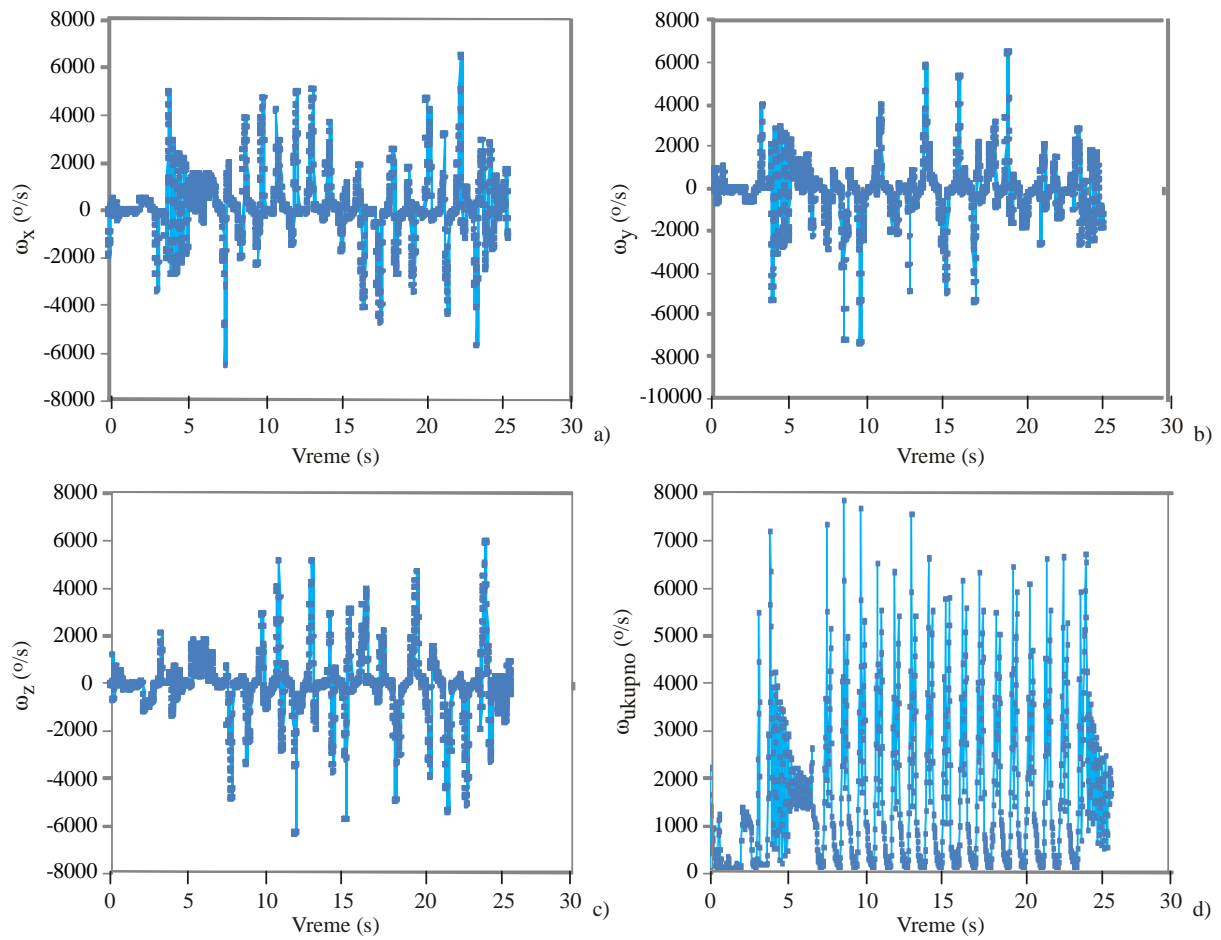
Korišćenjem numeričkih podataka dobijeni su sledeći dijagrami Ubrzanje težišne tačke uočene čestice pri kretanju kroz puž-projeksije,  $A_x(t)$ ,  $A_x(t)$ ,  $A_z(t)$  i  $A(t)$





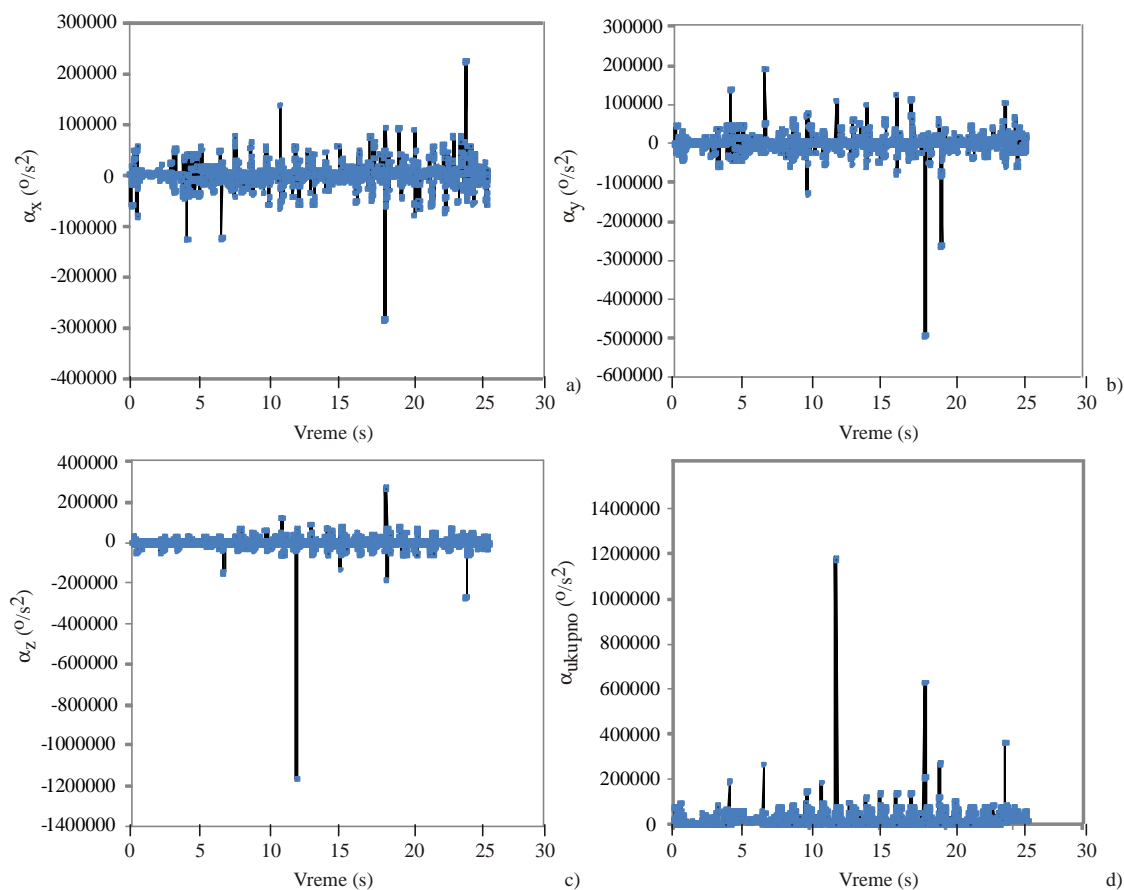
Slika 4.26. Ubrzanje čestice ( $\text{m/s}^2$ ) tokom kretanja kroz puž-projeksija a) u pravcu ose x, b) u pravcu ose y, c) u pravcu ose z d) zbirna

Korišćenjem numeričkih podataka dobijeni su sledeći dijagrami: Ugaona brzina težišne tačke uočene čestice pri kretanju kroz puž-projeksije,  $W_x(t)$ ,  $W_y(t)$ ,  $W_z(t)$  i  $W(t)$



Slika 4.27. Ugaona brzina čestice (deg/s) tokom kretanja kroz puz-projeksija a) u pravcu ose x, b) u pravcu ose y, c) u pravcu ose z d) zbirna

Korišćenjem numeričkih podataka dobijeni su sledeći dijagrami: Ugaono ubrzanje težišne tačke uočene čestice pri kretanju kroz puž-projeksije,  $AF_x(t)$ ,  $AF_y(t)$ ,  $AF_z(t)$  i  $AF(t)$

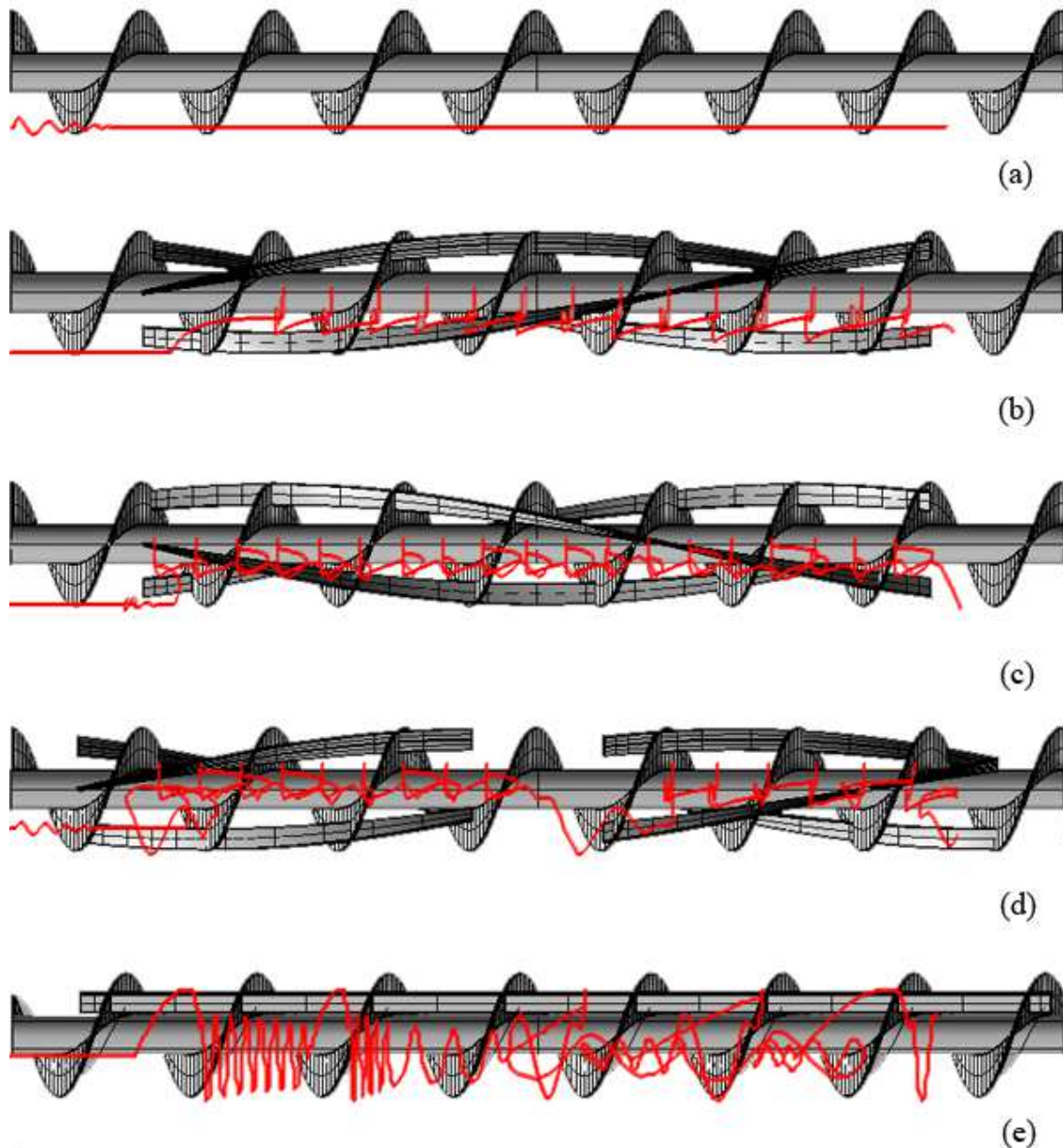


Slika 4.28. Ugaono ubrzanje čestice ( $\text{deg/s}^2$ ) tokom kretanja kroz puz-projeksija a) u pravcu ose x, b) u pravcu ose y, c) u pravcu ose z d) zbirna

Prikazani rezultati, slika 4.24 su za jednu izdvojenu česticu koja se kreće unutar modifikovanog pužnog transporter sa tri dodatne zavojnice orijentisane u istom smeru kao i spirala puža, od trenutka ulaska do trenutka izlaska iz istog.

Treba napomenuti da je DEM simulacija urađena za sve predhodno napomenute slučajeve i da je na osnovu toga urađeno poređenje dobijenih rezultata.

Trajektorije čestica su grafički prikazani na slici 4.29 ( crvenim linijama ).



Slika 4.29. Trajektorije čestica. a) puž sa konstantnim korakom zavojnice, b) modificovani pužni transporter sa tri dodatne zavojnice orijentisane u istom smeru kao i spirala puža, c) modificovani pužni transporter sa tri dodatne zavojnice orijentisane u suprotnom smeru od spirale puža, d) modificovani pužni transporter sa tri skraćene zavojnice orijentisane u suprotnom smeru od spirale puža i e) modificovani pužni transporter sa tri dodatne pravolinijske lopatice

Kretanje praškastih materijala i putanja pojedinačnih čestica su posmatrane od početnog trenutka kada prva čestica ulazi u modificovani pužni transporter do trenutka napuštanja spoljašnjeg cevnog omotača. U DEM simulaciji, zabeleženi su ukupna dužina

dobijene trajektorije, tokom simulacije, retenciono vreme (vreme zadržavanja) i kvalitet procesa mešanje (izraženo preko kriterijuma RSD). Ispitivan je uticaj modifikovane geometrije, sa dodatnim elementima, zavarenim na periferiji spirale standardnog pužnog transportera koji omogućavaju produžavanje putanje čestice tokom transportera. Takođe, na osnovu DEM analize, može se očekivati i povećanje brzine čestica.

Pužni transporter je često ispunjen sa manje od 50%, i mnogo zapremine iznad pužne zavojnice je prazno tokom transporta, a ova količina može da se koristi za dodatnu akciju mešanje tokom transporta. Tokom transporta u klasičnom pužni transporteru, čestice putuju uglavnom u pravoj liniji, duž transportera.

Efekat produžavanja puta pojedinačne čestice dovodi do poboljšanja mešanje između posmatranih čestica i povećanja verovatnoće da se čestice mešaju u toku transporta. Kretanje jedne posmatrane čestice je praćeno kako bi se pokazala moguća rešenja koja će povećati put čestice dodavanjem elemenata na pužnim spiralama, bez menjanja osnovnih dimenzija ili geometrije pužnog transportera.

U prvom slučaju, pužni transporter deluje samo kao jednostavni transporter, put čestica je gotovo ravna linija (sl. 4.30a), dok se u svim ostalim slučajevima čestica kreće sa mnogo dužom putu što je bilo naročito vidljivo u slučaju modifikovanog pužnog transportera sa tri dodatne pravolinijske lopatice (sl. 4.30e).

U slučaju puža sa konstantnim korakom zavojnice (slika 4.30a), ukupna trajektorija čestice je samo 436.1 mm, prema DEM simulaciji. Uočena je početna mala perturbacija, kada čestica ulazi u pužni transporter, a posle se čestica kreće duž prave linije, izazvane kretanjem pužne zavojnice.

Modifikovani pužni transporter sa tri dodatne zavojnice orijentisane u istom smeru kao i spirala puža (sl. 4.30b), značajno povećava ukupnu čestica puta, više od tri puta duže putanje čestice na prethodnom pužnom transporteru: 1612,2 mm , za isto vreme transporta 26.5s. Posle dostizanja vrha spirale, čestica pada na dole sa vrha spirale puža. Kada čestica padne, usled gravitacione sile, pada na sledeću slobodnu površinu pa se taj segment putanje može koristiti za pomoćno mešanje.

Kada se koristiti modifikovani pužni transporter sa tri dodatne zavojnice orijentisane u suprotnom smeru od spirale puža ( slika 4.30c ) za transport i pomoćno mešanje, trajektorija čestice se povećava još više, do 1949,1 mm , što je i očekivano, jer su ove zavojnice orijentisane na suprot od smera čestice, pa se čestice vraćaju malo u nazad , kao što se može videti sa slike 4.30c.

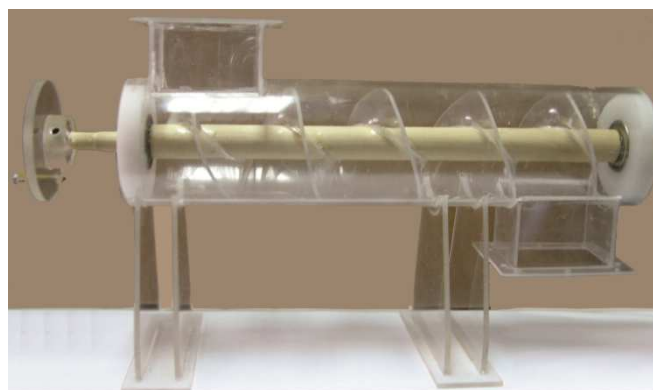
Put čestica je skraćen primenom modifikovanog pužnog transportera sa tri skraćene zavojnice orijentisane u suprotnom smeru od spirale puža (slika 4.30d), zbog lomljenja spirale na sredini pužnog transportera. U ovom slučaju, ukupna putanja je 1887,2 mm, prema DEM simulaciji.

Primena modifikovanog pužnog transportera sa tri dodatne pravolinijske lopatice omogućava najdužu trajektoriju pojedinačne čestice u DEM simulaciji (slika 4.30e): 2240,4 mm, što je malo više od pet puta u odnosu na puž sa konstantnim korakom zavojnice.

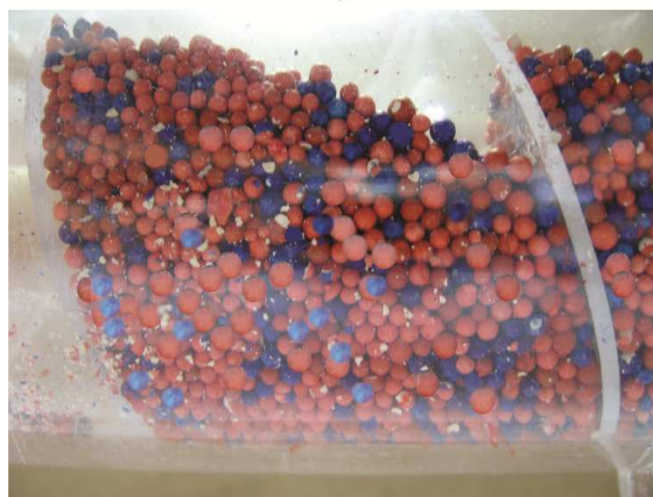
#### **4.3.1. Eksperimentalni rezultati ispitivanja homogenosti mešavine kuglica zeolita, za modifikovane pužne transportere**

Slika 4.31a predstavlja 400 mm dug pužni transporter koji je korišćen u našem eksperimentu, dok su eksperimentalni rezultati korišćenja modifikovanog pužnog transportera sa tri dodatne pravolinijske lopatice prikazani na slici 4.31b. Aproksimacija eksperimentalnih rezultata je bila neophodna da bi se uporedili eksperimentalni rezultati i rezultati modelovanja. Originalni kod je razvijen u tu svrhu.

Dobijene slike su prebačene na personalni računar. Svaka slika dala je podatke o boji i transformisana je u trodimenzionalni niz brojeva R (crveno), G (zeleno) i B (plavo), u rasponu od 0-255. Ovi podaci su obrađeni kako bi se odredile boje posmatranog piksela i da bi se promenile R, G i B vrednosti do odgovarajuće najbliže boje, (Jovanović i sar, 2014).



a)



b)

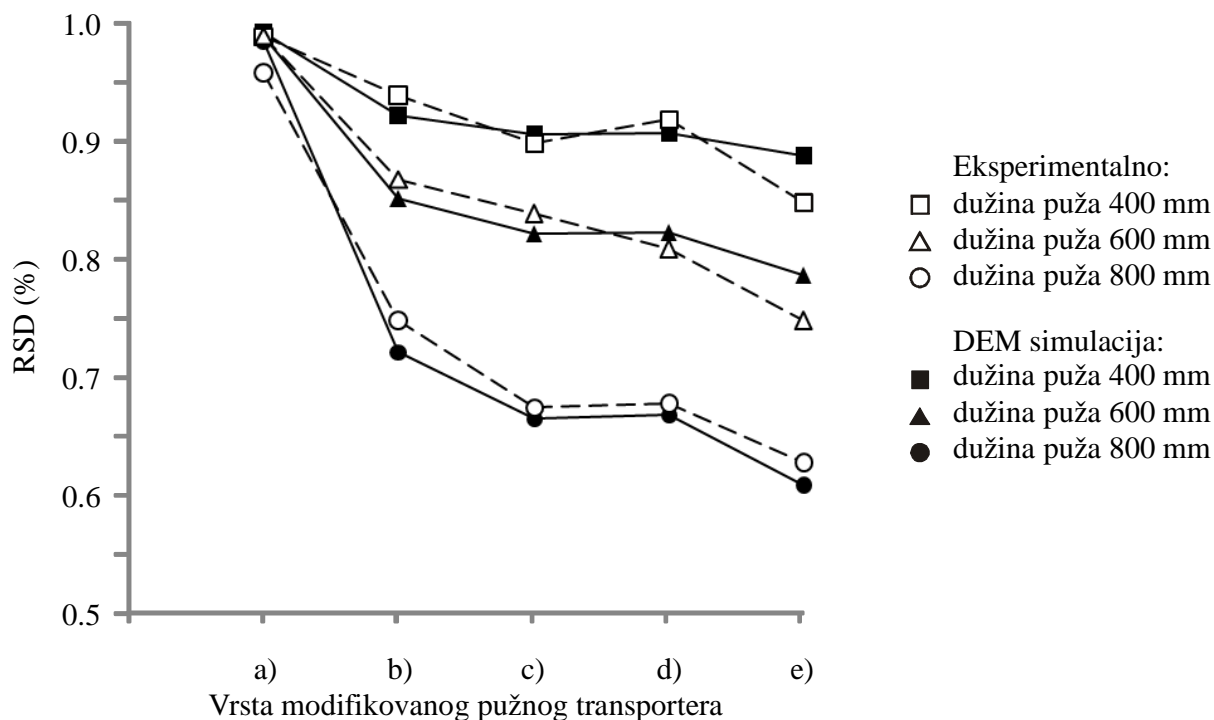
Slika 4.30. (a) Eksperimentalni pužni transporter (b) Rezultati mešanja, primenom modifikovanog pužnog transportera sa tri dodatne pravolinijske lopatice

#### **4.3.2. Poređenje eksperimentalnih rezultata i rezultata DEM simulacije pri transportu i mešanju u modifikovanim pužnim transporterima**

Stepen mešanja i vreme koje je potrebno da se postigne prihvatljiv rezultat mešanja može se predvideti korišćenjem DEM algoritma i eksperimentalnih merenja. U literaturi je predloženo nekoliko metoda za procenu stepen homogenosti smeše smeše (*Zhong i Callaghan, 1990* i *Jovanović i sar, 2014*). U ovoj disertaciji, korišćena je relativna standardna devijacija (RSD) da bi se pratio tok mešanja za različite konfiguracije pužnih transportera koje su gore opisane. RSD je dobro poznat kriterijum stepena mešanje u farmaceutskoj industriji, jednačina 4.1

Pokazano je da su numerički rezultati u dobroj saglasnosti sa eksperimentalnim rezultatima upoređivanjem kvalitet procesa mešanja, u odnosu na kriterijume RSD, (Lemieux, 2001).

Rezultati numeričke simulacije i eksperimentalnih procesa su predstavljeni na slici 4.32. Mešanje počinje čim se ukloni mobilni panel, omogućavajući granulama da padaju ka pužnom transporteru. Čestice se brzo mešaju ako su izvršena modifikacije na pužnoj spirali, kao što se vidi na slici, dostižući stepen mešanja između 90-95 % na izlazu pužnog transportera dužine 400 mm. Modifikovani pužni transporter sa dužinom od 600 mm dostiže malo bolji stepen mešanja ( 80 % -85 % ), dok je pužni transporter sa dužinom spirale od 800 mm postigao najbolji rezultat mešanja ( 63-74 % ). Modifikovani pužni transporter - mešalicu sa dodatna tri pravolinijske lopatice pokazuje bolje rezultate u odnosu na mešanje drugih modifikovanih pužnih transportera, na bilo kojoj dužini pužane spirale.



Slika 4.31. RSD kriterijum mešanja za modifikovane pužne transportere - oznake su kao na slici 4.29



## 5. ZAKLJUČAK

U okviru doktorske disertacije je ispitivana homogenost mešavina, kako eksperimentalnim putem, tako i primenom DEM (Discrete Element Method) numeričke simulacije. Matematičkim modelovanjem i numeričkim simulacijama je ispitivan process kretanja čestica pri transport u statičkim mešalicama i modifikovanim pužnim transporterima. Korišćene su dve vrste materijala: granule zeolita i mlevena kukuruzna prekrupa. Analiza je sprovedena za dva tipa statičkih mešalica, koja su najzastupljenija u industriji, Ross i Komax i za modifikovane pužne transportere. Klasični CFD (Computational Fluid Dynamics) modeli, zasnovani na Euler-ovom i Lagrange-ovom principu daju samo delimične informacije o procesima koji se odvijaju tokom procesa mešanja. Zato se sve više primenjuje DEM (Discrete Element Method), jer se na osnovu njega dobijaju pouzdane informacije o položaju, orijentaciji i brzini čestica, kao i o međusobnoj interakciji između čestica, kao i interakciji između čestica i zida. Spregnuti DEM/CFD je najkompleksniji, ali i najpouzdaniji, naročito u slučajevima kada fluid ima značajan uticaj na process mešanja.

Spregnuti DEM/CFD pristup za statičke mešalice je u ovom radu korišćen za istraživanje protoka fluida i praćenje toka zrnastih čestica. U DEM analizi, praćene su interakcije, čestica-čestica i čestica-zid, a integracije po vremenu su vršene korišćenjem drugog Njutnovog zakona kretanja. CFD analiza je korišćena za opisivanje polja brzina i pritisaka fluida korišćenjem modela mešavine. Praćene su trajektorije čestica, a određivane su i pozicije čestica tokom mešanja u cilju procene kvaliteta procesa mešanja. Usvojen je kriterijum za određivanje kvaliteta mešanja, pod nazivom relativna standardna devijacija RSD.

Pri CFD i DEM analizi je korišćena trodimenzionalna mreža na osnovu 3D modela, koji verno odgovara stvarnom geometrijskom modelu. Povećanjem broja čestica, koje se mešaju povećava se vreme izračunavanja, tj. trajanje same simulacije procesa kretanja istih u zadatim graničnim uslovima (definisanim 3D modela). Upotreba DEM simulacije je računarski izuzetno zahtevna i ograničena je konfiguracijom računara. Određivanje kontakta je vremenski najzahtevniji zadatak, kao i računarski najduža operacija i direktno zavisi od karakteristika računara na kojoj se simulacija radi.

Na osnovu matematičkog modelovanja su optimizovani parametri mešanja u statičkoj mešalici. Cilj ove studije je da se predvidi ponašanje granulamog materijala u različitim konfiguracijama mešalica i da optimizuje parametre procesa uzimajući u obzir cenu finalnog proizvoda mešanja, trajanje procesa mešanja i kvalitet mešavine.

Industrijska primena statičkih mešalica je moguća kao predmešača. Ugradnja statičke mešalice je prostorno moguća kao veza između vage za komponente i glavne mešalice.

Optimizacija je urađena za dva tipa statičke mešalice, Ross i Komax i za modifikovani pužni transporter. Pokazano je da su Komax elementi primenljiviji, jer daju bolje rezultate u procesu mešanja, u odnosu na Ross, posebno kada je visina instalacije mala. Međutim, upotreba Ross je finansijski prihvatljivija, zbog jednostavnije geometrije.

Dodatne pregrade sa kvadratnim otvorima, koja se postavljaju na izlazu iz statičke mešalice, koristi se da bi se umirilo kretanje granula na obodu cevi, kao i da se smanji segregacija granula.

Rađeni su eksperimenti za dve različite vrste materijala: zeolit i samlevena kukuruzna prekrupa. Primećeno je da je:

- Vreme kretanja zeolita kroz mešalice je znatno manje nego pri kretanju sa samlevenom kukuruznom prekrupom. Kukuruzna prekrupa koja je korišćena u eksperimentu je samlevena na mlinu čekićaru sa sitom od 3 mm imao je izmerenu vlagu oko 9,8 % što je isti slučaj i sa zeolitom koji je korišćen u eksperimentu. Ove granice su bile u skladu sa zahtevima Pravilnika o kvalitetu hrane za životinje 4/2010.
- Čestice zeolita se brzo mešaju u prvom delu, i dostiže se stepen mešanja od 20-27% na izlazu. Elementi za mešanje tipa Komax pokazuju bolje rezultate mešanja u ovom odeljku (20-22%, za DEM / CFD simulaciju, kao i za eksperimentalne rezultate) u odnosu na Ross (24-27%).
- Ovakav ishod je bio za očekivanje zbog geometrijski zakrivljenih površina. Komax elementi za mešanje bio je efikasniji i nakon drugog i trećeg segmenta, postigavši kvalitet mešanja od 6-8% i 4-5% na izlazu, dok je kvalitet mešanja za Ross konfiguracije bio svega 11-13% i 5-6% na izlazu..
- Mali, ali stabilan pad u kvalitetu mešanje se primećuje i za Komax i Ros mešalice na DEM / CFD simulaciji . Do ovoga dolazi usled dejstva centrifugalne sile koja utiče na kretanje granula koje izlaze iz mešalice.Smanjenje kvaliteta mešanja je još očiglednije u Komax konfiguraciji, zbog specifične geometrije ovih elemenata za mešanje.

- Upotrebom pregrade sa kvadratnim otvorima omogućava se da kvalitet mešanja ostane stalan nakon što granule napuste treći element za mešanje.
- Ugao nasipanja kukuruzne prekrupe samlevenog na mlinu čekićaru sa sitom od 3mm je 39°, dok je ta vrednost za zeolit 23°.
- U eksperimentu je uočeno da je protočnost zeolita znatno bolja nego u slučaju kukuruzne prekrupe samlevene na mlinu čekićaru sa sitom od 3mm.
- Zbog slabe tečljivosti kukuruzne prekrupe samlevene na mlinu čekićaru sa sitom od 3mm dolazilo je do zasvodnjavanja materijala u statičkoj mešalici tipa Komax na kojoj su i izvršeni eksperimenti. Da bi se materijal gravitaciono kretao kroz mešalicu neophodno je učešće prinudne vibracione sile na obodu mešalice.
- Pri mešanju sa kukuruznom prekrupom granulacije 3 mm u cilindričnoj mešalici, za odnos mešanja 1:10.000 homogenost je bila (RSD=10,38%), za 30 s, a dobra homogenost (RSD=9,49%), je tek postignuta nakon 150 s vremena mešanja.
- Pri mešanju sa kukuruznom prekrupom granulacije 3 mm kroz statičku mešalicu tipa Komax za odnos mešanja 1:10.000 pri jednom, tri i pet prolaska kroz isti, postignuta je homogenost koja nije zadovoljavajuća (RSD=22,69%).
- Pri mešanju u cilindričnoj mešalici sa kukuruznom prekrupom granulacije 3 mm, koji je preuzet iz eksperimenta nakon prolaska kroz statičku mešalicu tipa Komax nakon (pet prolazaka) postignuta je odgovarajuća homogenost (RSD=6,55%), za vreme mešanja od 75 s.
- Eksperimentom je utvrđeno da je vreme mešanje manje za 50%, kod odnosa mešanja 1:10 000 i granulacije od 3 mm.
- Za slučaj pužnih transportera je korišćen DEM model, na osnovu koga su određivani položaj i trajektorije čestica, koje učestvuju u mešanju.
- Optimizacija procesa mešanja je ostvarena modifikovanjem postojećeg pužnog transportera, tj. dodavanjem elemenata na obod spirale. Na osnovu DEM analize dobijene su informacije o položaju i brzini čestica tokom čitavog procesa mešanja, kao i oblik i dužina trajektorije, koju pređu čestice od trenutka ulaska u zavojnicu pužnog transportera do trenutka napuštanja zavojnice. Matematički model za modifikovane pužne transportere je pokazao dobro slaganje sa odgovarajućim eksperimentalnim rezultatima, u odnosu na kvalitet mešanja, tj. RSD kriterijum.
  - Pokazano je da je proces mešanja je kvalitetniji ukoliko za isto vreme transporta uočene čestice pređu duži put. Data je zavisnost između kvaliteta mešavine i dužine

trajektorije čestice u odnosu na geometriju pužnog transportera. Najduža putanja čestice dobijena u DEM simulaciji je kod modifikovanog pužnog transportera sa tri dodatne pravolinijske lopatice, što je iznosilo više od pet puta u odnosu na puž sa konstantnim korakom zavojnice.

- Promenom konstrukcije mešalice dodavanjem pomoćnih elemenata ili promenom dimenzija ili geometrije mešalice i primenom numeričke simulacije moguće je uticati na poboljšanje procesa mešanja.
- Putanja granule zeolita se drastično povećava ugradnjom tri dodatne zavojne površine usmerene u istom pravcu kao i pužna spirala (1458,2 mm, u poređenju sa 397,6 mm u slučaju pužnog transportera sa jednom spiralom).
- Skraćivanjem dodatnih zavojnica, koje su usmerene u istom smeru kao i pužna spirala, unekoliko se smanjuje putanja čestice, na dužinu od 1728,8 mm (usled prekidanja zavojnice na sredini pužnog transportera).
- Putanja čestice se produžava na 1764,4 mm, kada se ugrade dodatne zavojne površine koje su usmerene u suprotnom pravcu od pravca pužne spirale.
- Ugradnjom tri dodatna pravolinijske letve, dobijena je najduža putanja čestice: 2061,6 mm,
- Kombinovanim DEM/CFD pristupom omogućava se optimizacija geometrije mešalice, bilo statičke, bilo modifikovanog pužnog transportera, ali i druge procesne opreme korišćenjem numeričke simulacije i modelovanja na računaru, čime se značajno olakšava sagledavanje novih konstrukcionih rešenja. Ovim pristupom je moguće analizirati nove konstrukcije opreme bez njihove prethodne izrade i eksperimentalnih procedura, čime se značajno smanjuje vreme od ideje do probne serije, a time se smanjuje i cena razvoja opreme.

## 6. LITERATURA

Arratia P.E., 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.

Amerah, A.M., Ravindran, V., Lentle, R.G., Thomas, D.G. (2007) Feed particle size: Implications on the digestion and performance of poultry, *World's Poultry Science Journal*, Vol. 63, 439-455.

ASAE S319.3. Method of determining and expressing fineness of feed materials by sieving. In: *Agricultural Engineers Yearbook*. American Society of Agricultural Engineers, St. Joseph, MI, USA (2003) 589.

Axe, D. (1996) *Feed Production and Technology Manual*, IMC – Agrico Feed Ingredients, Illinois, 77–78.

Bakker M.J., Dispositif pour preparer du beton ou une matiere analogue, French Patent 959,155(1949).

Bardet, J. P., and Q. Huang. 1993. Rotational stiffness of cylindrical particle contacts. In *Powders and Grains* 93, 39-43. C. Thornton, ed. Rotterdam: Balkema.

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.

Bellamy, A. Nordon, D. Littlejohn, Non-invasive monitoring of powder mixing with near infrared spectrometry and acoustics, *Spectroscopy Europe* (2004), 30–32.

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.

Bertrand F., Leclaire L.-A., Levecque G., DEM-based models for the mixing of granular materials, *Chemical Engineering Science* 60 (2005), pp. 2517-2531.

Bilanski, W. K., B. Szot, I. Kushwaha, and A. Stepniwski. 1994. Comparison of strength features of rape pods and seeds for varieties cultivated in various countries. *International Agrophysics* 8(4), pp.177-184.

Boac J. M., Quality Changes, Dust Generation, and Commingling During Grain Elevator Handling, PhD Thesis, Kansas State University, Manhattan, Kansas, 2010.

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.

Bortolamasi M., Fottner J., Design and sizing of screw feeders, Proc. Partec 2001, Int. Congress for Particle Technology, Nuremberg, Germany, Paper 69 (2001) pp. 27–29.

Bridgwater J., Mixing of powders and granular materials by mechanical means-A perspective, *Particuology* 10 (2012) 397–427.

Bridgwater J., Handbook of Powder Technology. Mixing. Powder technology and pharmaceutical processes, p347-357, 1994 (in English).

Carthy M., Ottino J., Particle Dynamics simulation: a hybride technique applied to granular mixing. *Powder technology*, 97, p91-99, 1998 (in English).

Chaudhuri Bodhisattwa, Amit Mehrotra, Fernando J. Muzzio and M. SilvinaTomassone, Cohesive effects in powder mixing in a tumbling blender, *PowderTechnology* 165 (2), (2006), 105–114.

Chu K.W., Wang B., Xu D.L., Chen Y.X., Yu A.B., CFD–DEM simulation of the gas–solid flow in a cyclone separator, *Chemical Engineering Science* 66 (2011) 834–847

Chung, Y. C., J. Y. Ooi, and J. F. Favier., Measurement of mechanical properties of agricultural grains for DE models. In *17th ASCE Engineering Mechanics Conference*. Newark, Del.: American Society of Civil Engineers. (2004)

Chung, Y. C., and J. Y. Ooi, Influence of discrete element model parameters on bulk behavior of a granular solid under confined compression. *Particulate Science and Technology* 26(1) (2008): 83-96.

Cleary P.W., DEM modelling of particulate flow in a screw feeder, *Progress in Computational Fluid Dynamics*. 7 (Nos. 2/3/4) (2007) 128–138.

Cleary P.W., Discrete Element Modelling of industrial granular flow applications”, *TASK, Quarterly — Scientific Bulletin*, 2 (1998) 385–416.

Cleary P.W., Large scale industrial DEM modelling, *Eng. Computation*. 21 (2004) 169–204.

Cleary P.W., Metcalfe G., Liffman K., How well do discrete element granular flow models capture the essentials of mixing process?, *Applied Mathematical Modelling* 22, (1998), 995–1008.

Cleary P.W., Predicting charge motion, power draw, segregation, wear and particle breakage in ball mills using discrete element methods”, *Miner. Eng.* 11 (1998) 1061–1080.

Cullen P. J., Food mixing - Principles and Applications, Wiley Blackwell, Chichester, West Sussex, UK, 2009,

Cundall P. A., Strack O. D. L., A discrete numerical model for granular assemblies. *Géotechnique*, 29 (1979) 47–65.

- Danckwerts P.V., Continuous flow systems. Distribution of residence times: P. V. Danckwerts, *Chem. Engng Sci.* 2: 1–13, 1953, *Chemical Engineering Science*, 50(24) (1995) 385.
- Dewicki, G. 2003. Bulk material handling and processing – numerical techniques and simulation of granular material. *Bulk Solids Handling: International Journal of Storing and Handling Bulk Materials* 23(2): 110-113.
- Di Renzo A., Di Maio F.P., An improved integral non-linear model for the contact of particles in distinct element simulations, *Chemical Engineering Science* **60** (2005), pp. 1303-1312.
- Di Renzo A., Di Maio F.P., Comparison of contact-force models for the simulation of collisions in DEM-based granular flow codes, *Chemical Engineering Science* **59** (2004), pp. 525-541.
- Djordjevic, N., Discrete element modeling of the influence of lifters on power draw of tumbling mills. *Minerals Engineering* 16(4) (2003):331-336.
- Djordjevic, N., Shi F. N., and Morrison R. D., Applying discrete element modeling to vertical and horizontal shaft impact crushers. *Minerals Engineering* 16(10) (2003): 983-991.
- Djuragić O., Optimizacija procesa mešanja hrane za životinje u vertikalnim i cilindričnim mešalicama, Doktorska disertacija, Tehnološki fakultet Novi Sad, 2011.
- Fan L. T., Lai F. S., Auao Y., Shinoda K. And Yoshizawa E., 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.
- Fan L., Lait F., Numerical and experimental simulation studies on the mixing of particulate solids and the synthesis of a mixing system. *Computers and Chemical Engineering*, Vol. 2, p19-32, 1990 (in English).
- Fan L., A mechanic Kinetic Model of the Rate of Mixing Segregating Solid Particles. *Powder Technology*, 12, p139-156, 1975 (in English).
- Favier, J. F., Abbaspour-Fard M. H., and Kremmer M., Modeling of nonspherical particles using multisphere discrete elements. *Journal of Engineering Mechanics* 127(10): (2001), 971- 977.
- Favier, J. F., Abbaspour-Fard M. H., Kremmer M., and Raji A. O., Shape representation of axi-symmetrical, non-spherical particles in discrete element simulation using multielement model particles. *Engineering Computations* 16(4) (1999) :467-480.
- Fernandez J. W., Cleary P.W., McBride W., Effect of screw design on hopper drawdown of spherical particles in a horizontal screw feeder, *Chemical Engineering Science*. 66 (2011) 5585–5601.

- Fowler, R. T., and F. A. Wyatt. 1960. The effect of moisture content on the angle of repose of granular solids. *Australian Journal for Chemical Engineers* 1: 5-8.
- Fowler, R. T., and Chodziesner W. B., The influence of variables upon the angle of friction of granular materials. *Chemical Engineering Science* 10 (1959): 157-162.
- Geldart D., Abdullah E. C., Hassanpour A., Nwoke L. C., Wouters I., Characterization Of Powder Flowability Using Measurement Of Angle Of Repose, *China Particuology* Vol. 4, Nos. 3-4, (2006) 104-107,
- Ghanem, T. Lemenand, D. Della Valle, H. Peerhossaini, Static mixers: Mechanisms, applications and characterization methods – A review, *Chemical Engineering Research and Design*, 92 (2014) 205–228.
- Gupta, R. K., and Das S. K., 1997. Physical properties of sunflower seeds. *Journal of Agricultural Engineering Research* 66(1): 1-8.
- Gyenis J., Arva J.. Improvement of Mixing Rate of Solids by Motionless Mixer Grids in Alternately Revolving Mixers. *Powder Handling & Processing*, Vol. 1, N2, 1989 (in English).
- Gyenis J., Katai F.. Determination and Randomness in Mixing of Particulate Solids. *Chemical Engineering Science*, Vol. 45, N9, p2843-2855, 1990 (in English).
- Healy, B.J., Hancock J.D., Kennedy, G.A., Bramel-Cox, P.J., Behnke, K.C., Hines R.H. (1994) Optimum Particle Size of Corn and Hard and Soft Sorghum for Nursery Pigs, *Journal of Animal Science*, 72, 2227-2236.
- Hobbs D.M., Muzzio F.J., Reynolds number effects on laminar mixing in the Kenics static mixer. *Chem. Eng. J.* , 70 (2) (1998) 93–104.
- Hobbs D.M., Swanson P.D., Muzzio F.J., Numerical characterization of low Reynolds number flow in the Kenics static mixer. *Chem. Eng. Sci.*, 53 (8) (1998) 1565–1584.
- Hongming Li: Impact of cohesion forces on particle mixing end segregation, Dissertation, University of Pittsburg, 2002.
- Horner, D. A., J. F. Peters, and A. Carillo.. Large-scale discrete element modeling of vehicle-soil interaction. *Journal of Engineering Mechanics* 127(10) (2001) :1027-1032.
- Hoseney, R. C., and Faubion J. M., Chapter 1: Physical properties of cereal grains. In *Storage of Cereal Grains and Their Products*. 4th. ed. D. B. Sauer, ed. St. Paul, Minn.: American Association of Cereal Chemists, Inc. (1992)
- Hou Q.F., Dong K.J., Yu A.B., DEM study of the flow of cohesive particles in a screw feeder, *Powder Technology*. 256 (2014) 529–539.
- Hustrulid, A. I. 1998. Transfer station analysis. Paper presented at the 1998 SME Annual Meeting, Orlando, Fla., February 1998. Available at: <http://www.chutemaven.com>. Accessed on: August 10, 2006.



Isabel Figueroa, Hongming Li, Joseph McCarthy, Predicting the impact of adhesive forces on particle mixing and segregation, *Powder Technology* 195 (2009), 203–212.

Jiang, M. J., H. S. Yu, and D. Harris. 2005. A novel discrete model for granular material incorporating rolling resistance. *Computers and Geotechnics* 32(5): 340-357.

Johnson K.L., Rolling resistance of a rigid cylinder on an elastic-plastic surface, 76, *International Journal of Mechanical Sciences* 14 (1972), pp. 145-146.

Jovanović A., Pezo M., Pezo L., Lević Lj., DEM/CFD Analysis of Granular Flow in Static Mixers, *Powder Technology*. 266 (2014) 240-248.

Kafarov V.. Mixing and grinding of particulate solids. System analysis of the processes of Chemical technology, Science Publishers (Nauka), 1985 (in Russian).

Kaneko Y., Shiojima T.. Numerical analysis of particle mixing characteristics in a single helical ribbon agitator using DEM simulation. *Powder Technology* 109, p72-82, (2000) (in English).

Kaye H. Brian: Powder Mixing, Chapman & Hall, 276 pages, 1997.

Kehlenbeck V., Sommer K.. Different methods to determine the mixing performance of a batchwise working mixer. *Powder handling & processing*, Vol. 15 N5, (2003) (in English).

Ketterhagen, W. R., J. S. Curtis, C. R. Wassgren, and B. C. Hancock.. Modeling granular segregation in flow from quasi-three-dimensional, wedge-shaped hoppers. *Powder Technology* 179(3) (2008) : 126-143.

Kremmer, M., and Favier J. F., Calculating rotational motion in discrete element modeling of arbitrary-shaped model objects. *Engineering Computations* 17(6) (2000): 703-714.

Kremmer, M., and J. F. Favier. 2001a. A method of representing boundaries in discrete element modeling, part I: geometry and contact detection. *International Journal for Numerical Methods in Engineering* 51(12): 1407-1421.

Kremmer, M., and J. F. Favier. 2001b. A method of representing boundaries in discrete element modeling, part II: kinematics. *International Journal for Numerical Methods in Engineering* 51(12): 1423-1436.

Krugger-Emden H., Stepanek F., Munjiza A., A study on adjusted contact force laws for accelerated large scale discrete element simulations, *Particuology* 8 (2010), pp. 161-175.

Kumar V., Shirke V., Nigam K.D.P., Performance of Kenics static mixer over a wide range of Reynolds number. *Chem.Eng. J.* 139 (2) (2008) 284–295.

Kuo H.P., Knight P. C., Parker D. J., Tsuji Y., Adams M. J. and Seville J. P. K., The influence of DEM simulation parameters on the particle behaviour in a V-mixer, *Chemical Engineering Science* 57 (17), (2002), 3621–3638.

Kuo H.P., Numerical and experimental studies in the mixing of particulate material, PhD thesis, School of Chemical Engineering, The University of Birmingham UK (2001).

Lacey P.M.C., A.C.G.I., D.I.C., *The Mixing of Solid States*, Institution of chemical engineers, 21, (1943), 53.

Lacey P.M.C., Developments in the theory of particle mixing, *Journal of Applied Chemistry* 4 (5), (1954), 257-268.

Lemieux A., Leonard G., Doucet J., Leclaire L. A., Viens F., Chaouki J., Large-scale numerical investigation of solids mixing in a V-blender using the discrete element method, *Powder Technology*, 181 (2008) 205–216.

Les Consommateurs de Petrole, Dispositif pour le me'lange de deux ou plusieurs fluides, French Patent 735,033 (1931).

Lin J., Shu X. F., Dong J. X., The experimental determination of mechanical properties of zeolite ferrierite crystal, *Materials Letters*, 59 (12) (2005) 1595–1597.

Liu D., Bu C., Chen X., Development and test of CFD-DEM model for complex geometry: A coupling algorithm for Fluent and DEM, *Computers and Chemical Engineering*, 58 (2013) 260-268.

LoCurto, G. J., X. Zhang, V. Zarikov, R. A. Bucklin, L. Vu-Quoc, D. M. Hanes, and O. R. Walton. 1997. Soybean impacts: experiments and dynamic simulations. *Transactions of the ASAE* 40(3): 789-794.

Lynn R.S., Turbulator, US Patent 2,852,042, assigned to The Garrett Corporation (1958).

Maeda, Y., Y. Maruoka, H. Makino, and H. Nomura. 2003. Squeeze modeling simulation using discrete element method considering green sand properties. *Journal of Materials Processing Technology* 135(2-3): 172-178.

Makarov U.. Reactors for mixing of particulate solids. Machine building (Mashinostroenie), 1973 (in Russian).

Marigo.M., Diskrete element method modeling of complex granular motion in mixing veles, A thesis submitted to the School of Chemical Engineering of the University, doctorate in engineering, The University of Birmingham, 2012

Masson, S., and J. Martinez. 2000. Effect of particle mechanical properties on silo flow and stresses from distinct element simulations. *Powder Technology* 109(1-3): 164-178.

Mavromichalis, I., Hancock, J.D., Senne, B.W., Gugle, T.L., Kennedy, G.A., Hines R.H., Wyatt, C.L. (2000) Enzyme supplementation and particle size of wheat in diets for nursery and finishing pigs, *Journal of Animal Science*, 78, 3086-3095.

- Meijer H. E.H., Singh M. K., Anderson P. D., On the performance of static mixers: A quantitative comparison, *Progress in Polymer Science* 37 (2012) 1333– 1349.
- Mirghasemi, A. A., L. Rothenburg, and E. L. Matyas. 2002. Influence of particle shape on engineering properties of assemblies of two-dimensional polygon-shaped particles. *Geotechnique* 52(3): 209-217.
- Mishra B.K., A review of computer simulation of tumbling mills by the discrete element method: Part I—contact mechanics, *International Journal of Mineral Processing* 71 (2003), pp. 73-93.
- Misra, R. N., and J. H. Young. 1981. A model for predicting the effect of moisture content on the modulus of elasticity of soybeans. *Transactions of the ASAE* 24(5): 1338-1341, 1347.
- Moakher M., Shinbrot T., Muzzio F.J., Experimentally validated computations of flow, mixing and segregation of non-cohesive grains in 3D tumbling blenders, *Powder Technology* 109, (2000), 58–71.
- Mohsenin, N. N. 1986. *Physical Properties of Plant and Animal Materials*. 2nd ed. New York: Gordon and Breach Science Publishers.
- Molenda, M., and J. Horabik. 2005. Characterization of mechanical properties of particulate solids for storage and handling. Part 1. In *Mechanical Properties of Granular Agro-Materials and Food Powders for Industrial Practice*. J. Horabik and J. Laskowski. eds. Lublin: Institute of Agrophysics Polish Academy of Sciences.
- Moysey P. A., Baird M. H.I., Size segregation of spherical nickel pellets in the surface flow of a packed bed: Experiments and Discrete Element Method simulations, *Powder Technology*. 196 (2009) 298–308.
- Moysey P.A., Thompson M.R., Determining the collision properties of semi-crystalline and amorphous thermoplastics for DEM simulations of solids transport in an extruder, *Chemical Engineering Science*. 62 (2007) 3699 – 3709.
- Moysey P.A., Thompson M.R., Modelling the solids inflow and solids conveying of single-screw extruders using the discrete element method, *Powder Technology*. 153 (2005) 95 – 107.
- Mustoe, G. G. W., and M. Miyata. 2001. Material flow analyses of noncircular-shaped granular media using discrete element method. *Journal of Engineering Mechanics* 127(10): 1017- 1026.
- 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.
- Nelson, S. O. 2002. Dimensional and density data for seeds of cereal grain and other crops. *Transactions of the ASAE* 45(1): 165-170.

Neuwirth J., Antonyuk S., Heinrich S., Jacob M., CFD–DEM study and direct measurement of the granular flow in a rotor granulator, *Chemical Engineering Science* 86 (2013) 151–163.

Nienow A.W., Edwards M.F., Harnby N.: *Mixing in Process Industries*, Chapter 1-3, 1-23, 1992.

Oda M., Iwashita K., *An Introduction Mechanics of Granular Materials*, A.A.Balkema, Rotterdam, 1999.

Owen P.J., Cleary P.W., McBride B., Simulated granular flow in screw feeders using 3D Discrete Element Method (DEM), CHEMECA 2003, 31st Australian Chemical Engineering Conference, 2003, ISBN: 0-86396-829-5, Paper No. 203.

Paul E., Atlemo-Obeng V., Kresta S., *Handbook of industrial mixing –Science and practice* (2004), A. John Willey&Sons Inc.

Paul W. Cleary, Matt Sinnott, Rob Morrison, Analysis of stirred mill performance using DEM simulation:Part 2 – Coherent flow structures, liner stress and wear, mixing and transport, *Minerals Engineering*. 19 (2006) 1551–1572.

Paul W. Cleary, Particulate mixing in a plough share mixer using DEM with realistic shaped particles, *Powder Technology*. 248 (2013) 103–120.

Perry R., Green D., *Perry's Chemical Engineering Handbook*, 7th ed., McGraw-Hill, 1997.

Pfost, H. and V. Headley. 1976. Methods of determining and expressing particle size. In: H. Pfost (ed), *Feed Manufacturing Technology II - Appendix C.*, Am. Feed Manufacturers Assoc., Arlington, VA

Pierce M. E., PFC3D Modeling of Inter-Particle Percolation in Caved Rock Under Draw, Numerical Modeling in Micromechanics Via Particle Methods (Proceedings of the 2nd International PFC Symposium, Kyoto, Japan, October 2004), Y. Shimizu et al., Eds. Leiden: Balkema (2004) 149-156.

Ponomarev D., *Modeles Markoviens pour le melange des poudres en melangeur statique*, doktorska teza, L' institut national polytechnique de Toulouse, 2006.

Portillo Patricia M., Ierapetritou Marianthi G., Muzzio Fernando J., Effects of rotation rate, mixing angle, and cohesion in two continuous powder mixers—A statistical approach, *Powder Technology* 194 (2009), 217–227.

Potyondy, D. O., and P. A. Cundall. 2004. A bonded-particle model for rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 41(8): 1329-1364.

Poux M., Fayolle P., Bertrand J., Powder mixing: some practical rules applied to agitated systems, *Powder Technology*, 68 (1991) 213-234.

Rafiee M., Simmons M. J.H., Ingram A., Hugh Stitt E., Development of positron emission particle tracking for studying laminar mixing in Kenics static mixer, *Chemical Engineering Research and Design*, 91 (2013) 2106–2113.

Raji, A. O., and J. F. Favier. 2004a. Model for the deformation in agricultural and food particulate materials under bulk compressive loading using discrete element method, part I: theory, model development and validation. *Journal of Food Engineering* 64(3): 359-371.

Raji, A. O., and J. F. Favier. 2004b. Model for the deformation in agricultural and food particulate materials under bulk compressive loading using discrete element method, part II: compression of oilseeds. *Journal of Food Engineering* 64(3): 373-380.

Realpe, C. Velazquez, Image processing and analysis for determination of concentrations of powder mixtures, *Powder Technology* 134 (3), (2003) 193– 200.

Remy B., Khinast J. G., Glasser B. J., Polydisperse granular flows in a bladed mixer: Experiments and simulations of cohesionless spheres, *Chemical Engineering Science*, 66 (2011): 1811–1824.

Roberts A.W., The influence of granular vortex motion on the volumetric performance of enclosed screw conveyors, *Powder Technology*. 104 (1999): 56–67.

Roberts A.W., Willis A.H., Performance of grain augers, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*. 176 (8) (1962): 165–194.

Rothenburg, L., and R. J. Bathurst. 1992. Micromechanical features of granular assemblies with planar elliptical particles. *Geotechnique* 42(1): 79-95.

Sawada, S., and T. B. S. Pradham. 1994. Analysis of anisotropy and particle shape by distinct element method. In *Computer Methods and Advancements in Geomechanics*, Vol. 1, 665-670. Siriwardane, H. and M. M. Zaman, eds. Rotterdam, The Netherlands: Balkema.

Sharma, R. K., and W. K. Bilanski. 1971. Coefficient of restitution of grains. *Transactions of the ASAE* 14(2): 216-218.

Shimizu Y., Cundall P.A., Three-dimensional DEM simulation of bulk handling screw conveyors, *J. Eng. Mech.* 127(9)(2001): 864-872.

Smith, C. E., and P. Liu. 1992. Coefficient of restitution. *Journal of Applied Mechanics* 59(4): 963-969.

Stahl, B. M. 1950. Grain bin requirements. USDA Circular 835. Washington, D.C.: U.S. Department of Agriculture.

Stearns R.F., Method and apparatus for continuous flow mixing, US Patent 2,645,463, assigned to Standard Oil Development Company (1953).

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.

- Stewart, B. R. 1968. Effect of moisture content and specific weight on internal-friction properties of sorghum grain. *Transactions of the ASAE* 11(2): 260-266.
- Su J., Gu Z., Xu X. Y., Discrete element simulation of particle flow in arbitrarily complex geometries, *Chemical Engineering Science* 66 (2011): 6069-6088.
- Sudah O.S., Coffin-Beach D., Muzzio F.J., Quantitative characterization of mixing of free-flowing granular material in tote (bin)-blenders, *Powder Technology* 126 (2), (2002),: 191–200.
- Sutherland W.S., Improvement in apparatus for preparing gaseous fuel, UK Patent 1784 (1874).
- Swarbrick J., Boylan J.C., *Encyclopedia of Pharmaceutical Technology*, Vol. 5, 501 pages, 2001.
- Tabor D., The Mechanism of Rolling Friction. II. The Elastic Range, *Proceedings of the Royal Society London A* **229** (1955): 198-220.
- Tanaka, H., M. Momozu, A. Oida, and M. Yamazaki. 2000. Simulation of soil deformation and resistance at bar penetration by the distinct element method. *Journal of Terramechanics* 37(1): 41-56.
- Thakur R. K, Ch.Vial, Nigam K. D. P., Nauman E. B., Djelveh G., Static Mixers in the Process Industries – A Review, *Trans IChemE*, Vol 81, Part A, (2003): 787-826
- Thomas, P. A., and J. D. Bray. 1999. Capturing nonspherical shape of granular media with disk clusters. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 125(3): 169-178.
- Ting, J. M., L. R. Meachum, and J. D. Rowell. 1995. Effect of particle shape on the strength and deformation mechanism of ellipse-shaped granular assemblages. *Engineering Computations* 12(2): 99-108.
- Ting, J. M., M. Khwaja, L. R. Meachum, and J. D. Rowell. 1993. An ellipse-based, discrete element model for granular materials. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics* 17(9): 603-623
- Tollar J.E., Interfacial surface generator, US Patent 3,239,197, assigned to The Dow Chemical Company (1966).
- Towler G., Sinnott R., Chapter 18 – Specification and Design of Solids-Handling Equipment, *Chemical Engineering Design (Second Edition)*, 2013,: 937–1046.
- Tsuji Y., Kawaguchi T., Tanaka T., Discrete particle simulation of two-dimensional fluidized bed, *Powder Technology* **77** (1993): 79-87.
- Tsuji Y., Tanaka T., Ishida T., Lagrangian numerical-simulation of plug flow of cohesionless particles in a horizontal pipe, *Powder Technology* **71** (1992): 239- 250.

Tsuju Y., Kawaguchi T., Tanaka T., Discrete particle simulation of two-dimensional fluidized bed, *Powder Technology*, 77 (1993): 79-87.

Ullidtz, P. 1997. Modelling of granular materials using the discrete element method. In *Proceedings of the 8th International Conference on Asphalt Pavements*, Vol. 1, 757-769. August 10-14. Seattle, Wash.: University of Washington.

Veasey T.M., Plate type fluid mixer, US Patent 3,382,534, assigned to Monsanto Company (1968).

Vu-Quoc, L., X. Zhang, and O. R. Walton. 2000. A 3-D, discrete-element method for dry granular flows of ellipsoidal particles. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 187(3-4): 483-528.

Wang R., Fan L.. Multivariate Statistical Analysis of Solids Mixing. *Powder Technology*, 21, p171-182, 1978 (in English).

Wang R., Fan L.. Stochastic Modeling of Segregation in a Motionless mixer. *Chemical Engineering Science*, Vol. 32. p695-701, 1977 (in English).

Weinekötter R., Gericke H., *Mixing of solids*. Kluwer academic publishers, 2000 (in English).

Wightman, C., Moakher M., Muzzio F. J., and Walton O. R.,. Simulation of flow and mixing of particles in a rotating and rocking cylinder. *AIChE Journal* 44(6) (1998): 1266-1276.

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.

Williams J.. The segregation of particulate materials. *Powder Technology*, 15 p245-251, 1976 (in English).

Yang R.Y., Zou R.P., Yu A.B., Microdynamic analysis of particle flow in a horizontal rotating drum, *Powder Technology* **130** (2003): 138-146.

Yang, Y., and M. D. Schrock. 1994. Analysis of grain kernel rebound motion. *Transactions of the ASAE* 37(1): 27-31.

Yu Y., Arnold P.C., Theoretical modelling of torque requirements for single screw feeders, *Powder Technol.* 93 (1997) 151–162.

Zhang S.B., Sernas V., Incompressible model of solids conveying in a singlescrew extruder, *Journal of Reinforced Plastics and Composites* 21 (15) (2002), 1399–1409.

Zhang, X., Vu-Quoc L.. 2002. A method to extract the mechanical properties of particles in collision based on a new elasto-plastic, normal-force-displacement model. *Mechanics of Materials* 34(12): 779-794.

Zhong Z., O'Callaghan J. R., The Effect of the Shape of the Feed Opening on the Performance of a Horizontal Screw Conveyor, *J. agric. Engng Res.* 46 (1990) 125-128.

Zhou Y.C., Wright B.D., Yang R.Y., Xu B.H., Yu A.B., Rolling friction in the dynamic simulation of sandpile formation, *Physica A.* **269** (1999), pp. 536–553.

Zhou, Y. C., B. H. Xu, A. B. Yu, and P. Zulli. 2002. An experimental and numerical study of the angle of repose of coarse spheres. *Powder Technology* 125(1): 45-54.

Zhu H.P., Zhou Z.Y., Yang R.Y., Yu A.B., Discrete particle simulation of particulate systems: A review of major applications and findings, *Chemical Engineering Science* 63 (2008) 5728 – 5770.

Zhu H.P., Zhou Z.Y., Yang R.Y., Yu A.B., Discrete particle simulation of particulate systems: Theoretical developments, *Chemical Engineering Science* 62 (2007) 3378 – 3396.

Zhu H.P., Zhou Z.Y., Yang R.Y., Yu A.B., Discrete particle simulation of particulate systems: A review of major applications and findings, *Chemical Engineering Science* 63 (2008) 5728 – 5770.