

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Nikola Horvat

**Određivanje ulaznih parametara SFEM
simulacije pri razvoju proizvoda**

Zagreb, 2017.

Ovaj rad izrađen je u Zavodu za konstruiranje Fakulteta strojarstva i brodogradnje pod vodstvom dr.sc. Stanka Škeca i predan je za dodjelu Rektorove nagrade u akademskoj godini 2016./2017.

POPIS OZNAKA

Latinične oznake

A^*	mm ²	Površina presjeka agregata
A_{int}	mm ²	Površina projekcije agregata određena intervalom kuta interakcije čavla i agregata
A_{uk}	mm ²	Ukupna površina projekcije agregata
AC	mm	Klasa agregata
AC_j	mm	j -a klasa agregata
AC_{last}	mm	Zadnja klase agregata
B	-	Svjetlina promatranog piksela
B_{min}	-	Minimalna svjetlina agregata
C	-	Čvrstoća betona određena je na standardiziranom cilindru
d	mm	Promjer agregata
$d_1^{AC_j}; d_2^{AC_j}; d_3^{AC_j}$	mm	Reprezentativni promjeri agregata klase agregata AC_j
$d_{AC_j, \text{min}}$	mm	Najmanji promjer agregata unutar AC_j
$d_{AC_j, \text{max}}$	mm	Najveći promjer agregata unutar AC_j
d^*	mm	Ekvivalentan promjer presjeka agregata
d_{last}^*	mm	Ekvivalentan promjer presjeka zadnjeg agregata
$d_{SDI_k^*}^*$	mm	Najmanji ekvivalentni promjer unutar SDI_k^* intervala
$d_{SDI_k^*}^*$	mm	Najveći ekvivalentni promjer unutar SDI_k^* intervala
$E_{AC_j}^{\text{KV}}$	-	Faktor uvećanja broja agregata za klasu agregata AC_j u kontrolnom volumena
H	-	Ton boje promatranog piksela
H_D	-	Donja granica tona boje agregata
H_G	-	Gornja granica tona boje agregata
h	mm	Dubina agregata pogođenog s čavlom

$h_1^{AC_j}; h_2^{AC_j}; h_3^{AC_j}$	mm	Reprezentativne dubine agregata pogođenog s čavлом klase agregata AC_j
h_{cem}	mm	Dubina čavla u betonskom bloku – ako čavao nije u interakciji s agregatom
h_{ag}	mm	Dubina čavla u betonskom bloku – ako je čavao u interakciji s agregatom
$l_{SDI_k^*}^{RA_j}$	mm	Udaljenost između središta krajnjih vrijednosti SDI_k^* projicirani na RA_j
$l_{d^*}^{AC_j}$	mm	Udaljenost između središta krajnjih vrijednosti AC_j kada im je udaljenost sjecišta jednaka d^*
m_{AC_j}	$\frac{kg}{m^3}$	Maseni udio AC_j klase agregata
$n_{AC_j}^{KV}$	-	Broj AC_j klase agregata u kontrolnom volumenu
$n_{AC_j} = n_{RA_j}$	-	Ukupan broj agregata AC_j u betonskom bloku
n_{RV}	-	Broj reprezentativnih vrijednosti
P	-	Vjerojatnost
$P_{SDI_k^*}^{RA_j}$	-	Vjerojatnost da je presjek agregata unutar SDI_k^* dio klase agregata reprezentativnog promjera RA_j
$P_{d^*}^{AC_j}$	-	Vjerojatnost da je ekvivalentan promjer presjeka agregata dio AC_j
r	mm	Radijus agregata u virtualnom betonskom bloku
RA	mm	Reprezentativni promjer klase agregata
RA_j	mm	Reprezentativni promjer j klase agregata
RA_{last}	mm	Reprezentativni promjer zadnje klase agregata
SDI^*	mm	Interval ekvivalentnog promjera presjeka agregata
SDI_k^*	mm	k -ti interval ekvivalentnog promjera presjeka agregata
V_{KV}	mm ³	Kontrolni volumen
V_{AC_j}	mm ³	Volumen prosječne veličine agregata u AC_j klasi agregata

$V_{AC_j}^G$	mm ³	Volumen agregata u gornjem dijelu betona klase agregata AC_j
$V_{AC_j}^D$	mm ³	Volumen agregata u donjem dijelu betona klase agregata AC_j
X	mm	Udaljenost središta agregata od oplata betonskog bloka
x	mm	Udaljenost središta agregata od ishodišta koordinatnog sustava – x os
x^*	mm	Horizontalna udaljenost težišta površine presjeka agregata od ruba slike
y	mm	Udaljenost središta agregata od ishodišta koordinatnog sustava – y os
Z	mm	Udaljenost središta agregata od gornje površine betonskog bloka
z	mm	Udaljenost središta agregata od ishodišta koordinatnog sustava – z os
z^*	mm	Vertikalna udaljenost težišta površine presjeka agregata od ruba slike

Grčka slova

α	°	Kut interakcije čavla i agregata
$\alpha_1^{AC_j}; \alpha_2^{AC_j}; \alpha_3^{AC_j}$	°	Reprezentativni kutevi interakcije čavla i agregata kod klase agregata AC_j
α_{int}	°	Interval diskretizacije kuta interakcije čavla i agregata
μ	-	Srednja vrijednost
σ	-	Standardna devijacija
ρ_{ag}	$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	Gustoća agregata

POPIS KRATICA

AC	Klasa agregata (engl. <i>Aggregate Class</i>)
CT	Računalna tomografija (engl. <i>Computed Tomography</i>)
DEM	Metoda diskretnih elemenata (engl. <i>Discrete Element Method</i>)
DIS	Razlika u snazi (engl. <i>Difference in Strength</i>)
FEM	Metoda konačnih elemenata (engl. <i>Finite Element Method</i>)
GK	Veličina agregata (njem. <i>Gesteinkörnung</i>)
HSV	Ton boje, zasićenje boje, svjetlina (engl. <i>Hue, Saturation, Value</i>)
LHS	Uzorkovanje latinskom hiperkockom (engl. <i>Latin Hypercube Sampling</i>)
MCS	Monte Carlo simulacija (engl. <i>Monte Carlo Simulation</i>)
ppi	Piksela po jednom inču (engl. <i>Pixels per inch</i>)
RA	Reprezentativni agregat (engl. <i>Representative Aggregate</i>)
RGB	Crveno-zeleno-plavi prostor boja (engl. <i>Red-Green-Blue</i>)
SDI	Interval ekvivalentnog promjera (engl. <i>Section Diameter Interval</i>)
SFEM	Stohastička metoda konačnih elemenata (engl. <i>Stochastic Finite Element Method</i>)
SSFEM	Spektralna stohastička metoda konačnih elemenata (engl. <i>Spectral Stochastic Finite Element Method</i>)

SADRŽAJ

1. Uvod	1
1.1. Motivacija	1
1.2. Ciljevi rada.....	3
1.3. Hipoteze i istraživačka pitanja	3
1.4. Metodologija istraživanja	4
2. Pregled literature.....	5
2.1. Numeričke simulacije pri modeliranju slučajnih procesa	5
2.2. Ulazni parametri u simulacijama	7
2.3. Metode za određivanje nekontroliranih i/ili stohastičkih parametara.....	7
2.4. Beton.....	9
2.4.1. Matematički modeli betonskog bloka	10
2.4.2. Distribucija agregata u betonskom bloku.....	11
2.4.3. Obrada slike presjeka betonskog bloka.....	12
2.5. Implikacija za rad.....	13
3. Detaljna definicija problema	14
3.1. Utjecajni faktori na proces direktne montaže	14
3.2. Parametri interakcije čavla i agregata	15
3.3. Određivanje distribucije geometrijskih parametara	16
3.4. Distribucija agregata u betonskom bloku	18
4. Predložena metodologija određivanja parametara.....	19
4.1. Rezanje betonskog bloka	20
4.2. Snimanje slika.....	20
4.3. Obrada slike skeniranih presjeka betonskog bloka.....	21
4.4. Statistička analiza obrađenih slika	24
4.5. Modeliranje virtualnog betonskog bloka	32
4.6. Monte Carlo metoda procesa direktne montaže.....	32
4.7. Odabir reprezentativnih vrijednosti parametara interakcije.....	33
5. Eksperimentalni dio	35
5.1. Ulazni parametri eksperimenta	35
5.2. Rezanje betonskog bloka	37
5.3. Skeniranje uzoraka.....	37

5.4.	Obrada skeniranih slika	38
5.5.	Statistička analiza	38
5.6.	Virtualni betonski blok	40
5.7.	Monte Carlo metoda procesa direktne montaže.....	40
5.8.	Odabir reprezentativnih parametara.....	41
5.9.	Kombinacija parametara interakcije	41
6.	Rezultati.....	42
6.1.	Distribucija u vertikalnoj ravnini	42
6.2.	Distribucija u horizontalnoj ravnini	44
6.3.	Distribucija za virtualni betonski blok.....	45
6.4.	Virtualni betonski blok	46
6.5.	Monte Carlo simulacija procesa direktne montaže	47
6.6.	Reprezentativne vrijednosti parametara interakcije.....	49
6.7.	Definirane vrijednosti parametara za SFEM simulacije	50
7.	Diskusija	52
7.1.	Analiza distribucije agregata	52
7.2.	Stohastička analiza virtualnog betonskog bloka	54
7.3.	Odabir reprezentativnih vrijednosti	55
7.4.	Implikacije za istraživanje i industrijsku primjenu.....	55
8.	Zaključak	56

POPIS SLIKA

Slika 1.1 Proces direktne montaže; (Hilti, 2017)	2
Slika 3.1 Utjecaj agregata na dubinu prodiranja čavla	15
Slika 3.2 Pretpostavljeni geometrijski parametri interakcije čavla i agregata	16
Slika 3.3 Matematičko određivanje geometrijskog parametra - kut	17
Slika 3.4 Kompleksnost matematičkog određivanja geometrijskih parametara - kut.....	17
Slika 4.1 Proces razvoja čavla pomoću SFEM metode.....	19
Slika 4.2 Konačna slika nakon procesa skeniranja	20
Slika 4.3 Rezultat algoritma prepoznavanja rubova – lijevo i algoritma prepoznavanja boja – desno.....	22
Slika 4.4 Spojena slika dva pristupa – lijevo i finalna slika nakon ručne korekcije - desno ...	23
Slika 4.5 Značajke agregata	24
Slika 4.6 Intervali za promatranje pozicije agregata	25
Slika 4.7 Nedostatak 2D analize betonskog bloka	26
Slika 4.8 Moguće veličine agregata iz jednog presjeka	27
Slika 4.9 Minimalni i maksimalni promjer klasa agregata sa istim presjekom agregata	27
Slika 4.10 Definiranje parametra vjerojatnosti	29
Slika 4.11 Definicija kontrolnog volumena	31
Slika 4.12 Primjer određivanja reprezentativnih parametara predloženom metodom	34
Slika 5.1 Dimenzije betonskog bloka.....	35
Slika 5.2 Oplata, vibracijska podloga i lijevanja betonskog bloka	36
Slika 5.3 Uzorci za analizu distribucije agregata u vertikalnoj i horizontalnoj ravnini	37
Slika 5.4 Rezanje i rotiranje skenirane slike	38
Slika 5.5 Kombiniranje rezultata različitih slika.....	39
Slika 5.6 Ikone za vertikalne i horizontalne uzorke	40
Slika 6.1 Distribucija agregata u vertikalnoj ravnini.....	42
Slika 6.2 Usporedba gornjeg i donjeg dijela betonskog bloka.....	43
Slika 6.3 Distribucija agregata u horizontalnoj ravnini.....	45
Slika 6.4 Distribucija agregata u vertikalnoj ravnini – broj agregata.....	45
Slika 6.5 Usporedba distribucija provedene analize i DEM virtualnog betona	46
Slika 6.6 Distribucija parametara interakcije sa 20000 procesa direktne montaže – AC 4-8 mm	47

Slika 6.7 Distribucija parametara interakcije sa 20000 procesa direktne montaže – AC 8-16 mm	48
Slika 6.8 Distribucija parametara interakcije sa 20000 procesa direktne montaže – AC 16-32 mm.....	49
Slika 7.1 Presjeci betonskog bloka različitih proizvođača.....	53
Slika 7.2 Termalna slika presjeka betonskog bloka izloženog zračenju	53

POPIS TABLICA

Tablica 4.1 Primjer izlaznih vjerojatnosti za 4 AC intervala.....	29
Tablica 4.2 Izračunavanje broj agregata na određenoj dubini	30
Tablica 4.3 Izlazne vrijednosti statističke analize slika	32
Tablica 5.1 Analizirani betonski blok	36
Tablica 5.2 Planiranje pokusa za jednu klasu agregata	41
Tablica 6.1 Reprezentativne vrijednosti parametara interakcije	50
Tablica 6.2 Definirani parametri interakcija kao ulazne varijable u SFEM analizu	51

1. Uvod

1.1. Motivacija

Za tržišni uspjeh potrebno je imati cjenovno konkurentan proizvod s performansama koje zadovoljavaju korisnikove potrebe. Proces razvoja proizvoda započinje s konceptualnom fazom u kojoj je potrebno osmisliti moguće konstrukcijske alternative te provesti evaluaciju istih. Nakon završetka konceptualne faze, ključno je definirati konstrukcijske parametre važne za daljnju razradu u fazi oblikovanja i detaljiranja proizvoda. Slijed donošenja odluka vezan uz određivanje relevantnih konstrukcijskih varijabli naziva se parametarsko konstruiranje (Štorga, 2017) koje se sastoji od 5 koraka:

- Formuliranje problema gdje se definiraju parametri za vrednovanje rješenja (proizlaze iz tehničke specifikacije), konstrukcijske varijable (pod kontrolom su konstruktora) te parametri za definiranje problema (proizlaze iz specifičnih radnih uvjeta)
- Stvaranje alternativa
- Analiziranje alternativa gdje se predviđaju performanse pojedinih alternativa te kao rezultat dobivaju vrijednosti parametara za vrednovanje rješenja
- Vrednovanje alternativa gdje se vrijednosti parametara za vrednovanje rješenja koriste za izračun zadovoljstva kupca
- Usavršavanje/optimiziranje kojom se odabranoj alternativni pokušavaju poboljšati performanse.

Parametre za definiranje problema teško je eksplicitno definirati jer su specifični radni uvjeti uglavnom stohastičke prirode (npr. smjer i veličina vjetra, sile na alat pri radu na heterogenim materijalima itd.). Točna pretpostavka stohastičkih parametara uvelike doprinosi razumijevanju proizvoda te potpomaže proces vrednovanja alternativa. Pri određivanju stohastičkih parametara često se koristi statistika, stohastika, numeričke simulacije i ostali matematički alati pomoću kojih je moguće definirati distribuciju vrijednosti nepoznatih parametara. Sa takvom definicijom moguće je provesti analizu alternativa za diskretizirane vrijednosti parametara proizlašlih iz specifičnih radnih uvjeta.

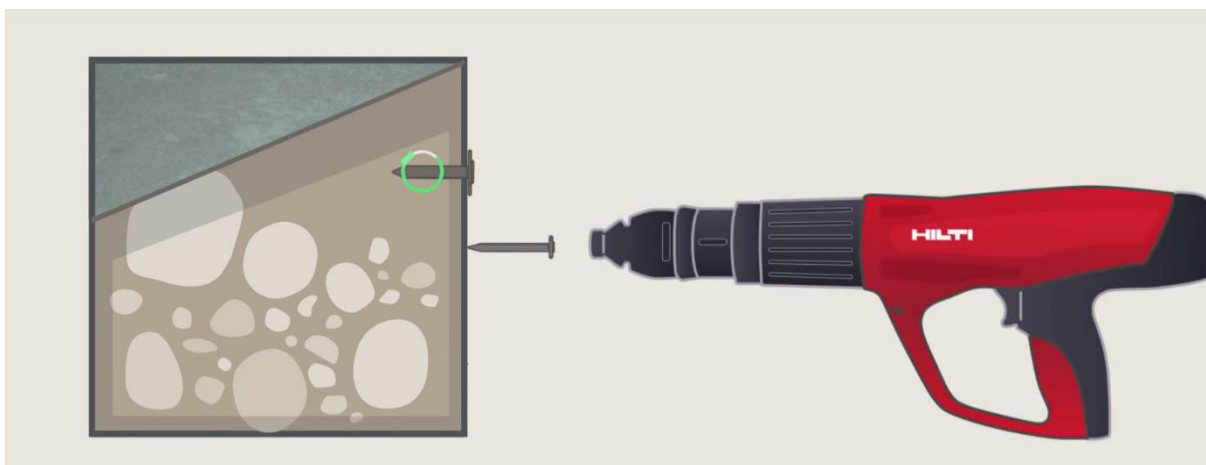
Proces direktne montaže (engl. *Direct Fastening*) (Slika 1.1) kojim se, bez prethodnog bušenja provrta, na betonski blok čavlom pričvršćuje dodatak jedan je od primjera gdje heterogeni materijali utječu na vrijednosti parametara za definiranje problema. Ovakav način spajanja

omogućuje brže spajanje materijala nego što je to običaj s vijcima, zavarivanjem ili nekim drugim procesom spajanja materijala. Također, moguće je vršiti montažu gdje nema dostupne električne energije. Proces je puno tiši, pristupačniji te stvara manje prašine od bušenja i spajanja vijcima. U direktnoj montaži, proizvod na koji heterogenost ima najveći utjecaj jest čavla te je za analiziranje njegovih alternativa, uputno definirati distribuciju te diskretizirati vrijednosti parametara koji utječu na performanse čavla. Diskretizirane vrijednosti koriste se za određivanje skupa analiza jedne alternative čijom se analizom izračunava vrijednost parametra za vrednovanje. Skup tako provedenih analiza provodi se za svaku alternativu proizvoda te se dobiveni rezultati koriste kod vrednovanje alternativa.

Pri razvoju proizvoda analiziranje alternative može se provesti:

- Analitički kod jednostavnijih problema
- Numeričkim simulacijama kada ne postoje analitički izrazi, a eksperiment nije isplativ
- Eksperimentalno ako se korištenje ostalih metoda ne isplati ili ne pokaže mogućim. Često se koristi u ranim fazama razvoja proizvoda te kao rezultat daje vrlo konkretne zaključke.

Prikupljanje iskustva bez rizika te mogućnost variranja varijabli neke su od prednosti numeričkih simulacija (Štorga, 2017). Međutim, pri numeričkim simulacijama, treba biti svjestan 4 izvora grešaka koja se mogu javiti (Singer, 2012): Ulazni podaci (mjerjenja), model, metode za rješavanje modela i aritmetika računala. Stoga je, pri proučavanju procesa na kojega utječe heterogenost betona, ulazne podatke potrebno je uvesti uzimajući u obzir stvarna svojstva betona.



Slika 1.1 Proces direktne montaže; (Hilti, 2017)

1.2. Ciljevi rada

Cilj ovog istraživanja jest razviti metodologiju kojom će se, pri parametarskom konstruiranju čavla u procesu direktne montaže, implementirati distribucija vrijednosti parametara za definiranje problema. Vrijednosti će se koristiti u numeričkim simulacijama koje omogućuju mogućnost variranja varijabli. Potrebno je odrediti distribuciju stohastičkih parametara što zahtjeva da se istraživanjem provede:

1. Identifikacija i analiza distribucije agregata u betonskom bloku koja će služiti kao osnova za modeliranje procesa direktne montaže
2. Modeliranje procesa direktne montaže kojom će se dobiti distribucija stohastičkih parametara potrebnih za numeričke simulacije
3. Planiranje pokusa radi određivanja konačnog broja simulacija koje će dati uvid u ponašanje čavla za cijeli raspon stohastičkih parametara

Razvoj metodologije za analizu distribucije agregata u industrijskom okruženju ponudit će korisnicima ekonomski isplativu i vjerodostojnu analizu kojom je moguće dobiti informacije o betonskom bloku. Analizirana distribucija omogućit će precizno modeliranje procesa direktne montaže što je neizbježno za dobivanje distribucije stohastičkih parametara.

Metodologija planiranja pokusa obuhvatit će cijeli raspon stohastičkih parametara te odrediti njihove reprezentativne vrijednosti za skup simulacija kojima će se analizirati varijacije čavla na proces direktne montaže. Tako definirani skup simulacija može se postaviti za industrijski standard u procesu razvoja proizvoda kojim će se analizirati i uspoređivati varijante proizvoda.

1.3. Hipoteze i istraživačka pitanja

Predloženi ciljevi istraživanja verificirat će dvije hipoteze:

1. Promatranjem distribucije agregata i njihove interakcije sa čavlom moguće je razviti standardizirane parametre simulacija kojima će se, nakon što se provedu sve simulacije, moći ocijeniti performanse čavla,
2. Prepoznavanje i analiza distribucije agregata moguća je u industrijskom okruženju koje ne posjeduje sofisticirane istraživačke uređaje.

Kako bi se hipoteze potvrdile, osmišljena su sljedeća istraživačka pitanja na koja će se ovim radom odgovoriti:

1. Kako odrediti stohastičke parametre koji utječu na proces direktne montaže?
2. Kako prikupiti podatke o distribuciji agregata u betonskom bloku?

-
3. Kako odrediti distribuciju stohastičkih parametara?
 4. Kako odrediti reprezentativne parametre potrebne za simulaciju?

Predložena metodologija za određivanje reprezentativnih slučajeva simulacija, kao i metodologija za određivanje distribucije agregata temeljit će se na istraživanjima provedenim u industrijskom okruženju.

1.4. Metodologija istraživanja

Istraživanje će se provesti koristeći opću metodologiju istraživanja (Blessing & Chakrabarti, 2009) koja se sastoji od 4 koraka:

1. Pojašnjenje istraživanja u kojem se opisuju ciljevi istraživanja, istraživačka pitanja te prikazuje sama metodologija istraživanja.
2. Deskriptivna analiza trenutnog stanja sastoji se od pregleda literature na području numeričkih analiza za opisivanje stohastičkih procesa, metoda za određivanje distribucije stohastičkih parametara, betona i njegovih matematičkih modela, distribucije agregata u betonu i obrade slike presjeka betonskog bloka te detaljne definicije problema kojom su definirani stohastički parametri koji utječu na proces direktne montaže
3. Preskriptivna analiza gdje se na temelju pregleda literature i istraživanja u industrijskom okruženju predlaže metodologija za analizu stohastičkih parametara kod procesa direktne montaže, uključujući analizu betonskog bloka, određivanje distribucije parametara. U ovom koraku dani su i rezultati dobiveni provođenjem predložene metodologije.
4. Deskriptivna analiza završnog stanja gdje se predložena metodologija vrednuje, postavljaju poveznice sa pregledanom literaturom, analiziraju dobiveni rezultati te predstavlja poboljšanja metodologije. Usporedbom predložene metodologije i rezultata prosuđuje se da li su postignuti svi ciljevi te je na kraju prikazana implikacija u znanstvenom i industrijskom svijetu.

Definiranom metodologijom istraživanja ujedno je i dovršen prvi korak istraživanja te je moguće započeti sa deskriptivnom analizom trenutnog stanja. Prije same analize valja napomenuti da iteracije između svih koraka metodologije omogućuju primjenu novih metoda u preskriptivnoj analizi, reformulaciju ciljeva i detaljnije proučavanje literature na temelju novih spoznaja i sl. te su u ovom istraživanju pomogle u ostvarivanju ciljeva.

2. Pregled literature

Drugi korak metodologije istraživanja daje opis trenutnog stanja te se sastoji od pregleda literature na području numeričkih simulacija s naglaskom na stohastičke metode konačnih elemenata (SFEM – engl. *Stochastic Finite Element Method*) kako bi se proučila moguća implementacija stohastičkih parametara u numerički model. Nadalje, proučene su metode kojima se određuju stohastički parametri u SFEM-u te će se iste koristiti kao osnova za daljnji razvoj modela direktne montaže. Radi objašnjenja postojećeg stanja te postavljanja dobrih temelja dane su osnove te istraživački doprinos u svakom od područja zanimljivih za identifikaciju i analizu distribucije agregata u betonskom bloku.

2.1. Numeričke simulacije pri modeliranju slučajnih procesa

Računalne simulacije u razvoju proizvoda omogućuju, između ostalog, predviđanje performansi proizvoda bez izrade fizičkog modela čime se znatno mogu uštediti razvojni resursi. Rezultat analize mogu biti razni parametri (naprezanje, deformacija, kinematika, protok materijala itd.) čijim je predviđanjem smanjen rizik od nefunkcioniranja proizvoda. Jedna od često korištenih simulacija u razvoju proizvoda jest i numerička analiza konstrukcija za koju se najčešće koristi metoda konačnih elemenata (MKE) ili njene varijacije. U metodi konačnih elemenata problem je diskretiziran konačnim brojem elemenata spojenih u čvorovima za koje se pretpostavljaju modeli pomaka (polinomi) te na temelju njih izračunavaju matrice krutosti i opterećenja. Matrice krutosti i opterećenja rijetko se računaju direktno iz jednadžbi ravnoteže jer taj način ne omogućuje rješavanje praktičnih (kompleksnijih) rješenja. U praksi se koristi metoda težinskog reziduala kojom se pretpostavljaju oblici rješenja diferencijalnih jednadžbi ponašanja konstrukcije dok se konstante rješenja računaju tako da rezidual rješenja ili njegova varijacija bude jednaka nuli. Pored kompleksnijih problema, metoda konačnih elemenata je prikladna i za vremenski ovisne probleme te nelinearno ponašanje materijala (Arregui-Mena, Margetts, & Mummery, 2014). Metoda konačnih elemenata jest deterministička metoda i prema tome ne može direktno proučavati pouzdanost sustava u kojem postoji određena nesigurnost (devijacija materijalnih, geometrijskih, rubnih i ostalih karakteristika) uzrokovana ljudskom greškom, dinamičkim opterećenjem, nedostatkom podataka ili ostalim utjecajnim faktorima.

Metode koje se koriste pri opisivanju nesigurnosti konstrukcije u simulacijama opisani su stohastičkom metodom konačnih elemenata (SFEM – eng. *Stochastic finite element method*)

koja je, kako je Stefanou (2009) opisuje, proširenje klasične metode konačnih elemenata za određivanje statičkih i dinamičkih problema sa stohastičkim mehaničkim svojstvima, geometrijskim svojstvima i/ili opterećenjima. Sve SFEM metode sastoje se od dva koraka (Stefanou, 2009):

1. Određivanja ulaznih parametara sustava te
2. Propagacije nesigurnosti u sustav i ocjenjivanja stohastičkog odziva.

Prvi korak bazira se na različitim načinima određivanja nesigurnosti koji je zajednički svim SFEM metodama i stoga će biti objašnjen kasnije. Način uvođenja nesigurnosti u sustav jedinstven je kod svake metode te određuje prikladnost SFEM metode. Najprihvaćenije i najkorištenije metode SFEM-a su (Arregui-Mena et al., 2014):

- Monte Carlo simulacija (MCS),
- Perturbacijska metoda te
- Spektralna stohastička metoda konačnih elemenata (SSFEM – eng. Spectral stochastic finite element method).

Monte Carlo simulacija spaja Monte Carlo metodu uzorkovanja ulaznih parametara sa determinističkom metodom konačnih elemenata. Naime, bazirano na distribuciji ulaznih parametara, slučajnim odabirom mijenjaju se vrijednosti u matrici krutosti te se provodi deterministička metoda konačnih elemenata. Broj ponavljanja opisanog procesa ovisi o željenoj točnosti izlaznih statističkih vrijednosti simulacija (50 za grubu aproksimaciju srednje vrijednosti i devijacije npr. pomaka elementa te 500 za procjenu parametara (Stefanou, 2009)). Lako je zaključiti da je Monte Carlo simulacija, zbog velikog broja simulacija određenih Monte Carlo uzorkovanjem, izrazito točna metoda, ali zahtjeva veliki utrošak vremena računanja. Stoga se često koristi kao validacija rezultata dobivenih ostalim SFEM metodama.

U perturbacijskoj metodi, slučajnost u sustav uvodi se proširenjem matrica jednadžbe elementa (krutosti, pomaka te sila) Taylor-ovim redovima s pretpostavkom da je prvi član reda puno veći od ostalih članova reda. Metoda je stoga ograničena vrijednostima slučajne varijable koja ima nisku devijaciju, ali svejedno se, zbog balansa između kompleksnosti i računalne zahtjevnosti, često koristi za analizu stohastičkih odziva (Arregui-Mena et al., 2014).

SSFEM se najviše koristi pri opisivanju slučajnih materijalnih svojstava sustava. U njoj se slučajnost uvodi proširenjem matrice krutosti u red neovisnih slučajnih varijabli te proširenjem matrice pomaka u red slučajnih Hermitovih polinoma (Ghanem & Spanos, 2003). Za veliki broj stupnjeva slobode sustava SSFEM metoda postaje računalno zahtjevna (Stefanou, 2009).

2.2. Ulazni parametri u simulacijama

U numeričkim simulacijama, kao ulaz postoje dvije vrste parametara (Stefanou, 2009): kontrolirani (geometrija, materijal na makrorazini itd.) i nekontrolirani (heterogenost tla, vjetar, okolišna temperatura itd.). Kontrolirani parametri mogu se lako opisati jer su im distribucije definirane od strane konstruktora. SFE analize sa kontroliranim ulaznim parametrima rezultiraju vrijednostima kojima se može odrediti vrijednost parametra za vrednovanje alternativa i time optimizirati konstrukciju za jednoznačno definirane radne uvjete. Al-momani i Rawabdeh (2008) koristili su diskretizaciju kontroliranih varijabli pri optimizaciji procesa probijanja lima kako bi dobili optimalne parametre potrebne za konstrukciju probijačice dok je Zahn (1998) diskretizacijom snage, površine i ostalih parametara integriranog kruga i 25 simulacija empirički odredio jednadžbe za predviđanju termalnih granica hladnjaka integriranih sklopova ovisno o njihovoj snazi, površini i ostalim parametrima.

Nekontrolirani parametri pri razvoju proizvoda iziskuju više resursa te se stoga rjeđe koriste pri proučavanju proizvoda, ali njihovom implementacijom moguće je dobiti potpuniju predodžbu o ponašanju proizvoda i time detaljnije odrediti vrijednosti parametara za vrednovanje rješenja. Lin (2011) je pri razvoju brzohodnog motoriziranog vretena definirao 18 MKE simulacija varirajući kontrolirane parametre te svakoj dodijelio linearno diskretizirane vrijednosti nekontroliranog parametra – brzine vrtnje vretena. Determinističkom MKE metodom odredio je prve vlastite frekvencije svakog definiranog slučaja te na osnovu dobivenih rezultata optimirao kontrolirane parametre vretena.

Daljnijim proučavanjem metoda za određivanje nekontroliranih i/ili stohastičkih parametara moguće je postaviti dobru teorijsku osnovu za razvoj metodologije kojom će se implementirati distribucija parametara za definiranje problema kod procesa direktne montaže.

2.3. Metode za određivanje nekontroliranih i/ili stohastičkih parametara

Kako je već ranije rečeno, određivanje slučajnih ulaznih parametara sustava je zajedničko svim SFE metodama te se može provesti na tri različita načina:

- Analitički gdje se pretpostavlja distribucija
- Simulacijama pomoću kojih se distribucija dobije iz matematičkog modela
- Eksperimentalno gdje se distribucija analizira/mjeri na fizičkom eksperimentu.

Analitičke metode se vrlo često koriste pri razvoju proizvoda, naročito kada nije moguće niti simulirati niti eksperimentalno utvrditi distribuciju ulaznih parametara. Iako većina slučajnih ulaznih parametara nema distribuciju temeljenu na Gaussovoj funkciji gustoće vjerojatnosti, ista se zbog svoje jednostavne upotrebe, manjka eksperimentalnih rezultata te centralnog graničnog teorema vrlo često koristi (Arregui-Mena et al., 2014). Stefanou i Papadrakakis (2004) koristili su Monte Carlo SFE metodu sa spektralnom reprezentacijom ulaznih parametara za analizu ljsaka sa stohastički određenim materijalnim (modul elastičnosti i Poisson-ov koeficijent) i geometrijskim (debljina ljske) svojstvima. Korištenjem stohastičkog elementa proučavali su utjecaj stohastičkih parametara na rezultate naprezanja i deformacija cilindričnih i hiperbolnih ljsaka. Parametri koji ne podliježu centralnom graničnom teoremu (vjetar, valovi, svojstva tla) analitički se opisuju pomoću ne-Gaussovih procesa koji se mogu generirati translacijom Gaussovog stohastičkog procesa. Popescu et al. (2005) proučavali su utjecaj heterogenosti tla na njegovu nosivost na temelju ne-Gaussovog slučajnog polja sa predodređenom distribucijom ulaznih parametara.

Simulacijskim metodama, stvarni eksperiment opisuju se matematičkim modelom koji služi za određivanje distribucije. Time se omogućuje prikupljanje iskustva bez rizika i u kontroliranim uvjetima, ali i jednostavnije promatranje parametara. U odnosu na analitičku metodu, dobiva se detaljniji uvid u stvarnu distribuciju parametara. Najpoznatija simulacijska metoda koja se koristi za analizu distribucije ulaznog parametra jest Monte Carlo uzorkovanje kojoj se proces može se podijeliti u 6 koraka (Du, n.d.):

1. Napraviti matematički model stvarnog sustava
2. Definirati distribuciju ulaznih varijabli u sustav
3. Definirati izlazne varijable sustava
4. Ovisno o distribuciji, odrediti uzorke ulaznih varijabli
5. Prema matematičkom modelu, za uzorke ulaznih varijabli, odrediti vrijednosti izlazne varijable sustav
6. Izvući statističke podatke izlaznih varijabli.

Postoje i varijacije Monte Carlo metode koje se uglavnom fokusiraju na efikasnije određivanje uzorka ulaznih varijabli (npr. Latin Hypecube Sampling, Kvazi-Monte Carlo metoda itd.). Razlika u efikasnosti simulacijskih metoda ovisi o slučaju koji se razmatra te nekada može biti zanemariva. Kostić i sur. (2017) su Monte Carlo metodom tražili distribuciju tlačne čvrstoće betona ovisno o gustoći, omjeru vode i cementa i ostalim utjecajnim parametrima. Distribucija

očekivanih vrijednosti tlačne čvrstoće betona može se kasnije koristiti u nekoj od SFE metoda kao nekontrolirani ulazni parametar. Simulacijskim određivanjem distribucije ulaznih parametara moguće je uštediti značajne resurse, međutim potrebno je napraviti matematički model koji će realno opisivati eksperimentalne uvjete. Za izradu matematičkog modela koji realno opisuje sustav često je potrebno provesti manji broj eksperimenata i time osigurati vjerodostojne rezultate Monte Carlo metode. Kostić i sur. (2017) su ispitivanjem tlačne čvrstoće na 54 uzoraka definirali matematički model računanja tlačne čvrstoće ovisan o vremenu i parametrima smjese betona .

Dio istraživanja koje su Kostić i sur. (2017) proveli pomoću Monte Carlo metode moguće je provesti i pomoću eksperimenta te na taj način dobiti distribuciju očekivanih vrijednosti tlačne čvrstoće betona. Međutim, ispitivanje tlačne čvrstoće velikog broja betona iziskuje više vremena i resursa nego Monte Carlo metoda što je ujedno i glavni nedostatak eksperimentalnog načina određivanja ulaznih parametara.

Stoga se može zaključiti da je simulacijski način određivanja slučajnih parametara optimalan u pogledu troškova i kvalitete te će se u ovom radu koristiti za određivanje distribucije parametara za definiranje problema. Ranije je rečeno da je potrebno imati adekvatan matematički model stvarnog sustava kako bi Monte Carlo metoda pouzdano zamijenila fizikalni eksperiment i stoga će se u idućim poglavljima proučiti beton, njegovi matematički modeli i njihovo određivanje. Time će se postaviti dobra osnova za definiranje matematičkog modela direktne montaže jer heterogenost betona značajno utječe na proces (Hilti, 2015).

2.4. Beton

Beton je kompozitni materijal koji nastaje miješanjem agregata, cementa, vode i dodataka. Nakon procesa lijevanja u oplatu, heterogena smjesa vremenski se solidificira i očvršćuje do krajnje čvrstoće koja je ovisna o mnogo parametara (vrsta sastojaka, maseni udio sastojaka, vremenski uvjeti itd.). Parametri koji utječu na svojstva betona predmet su brojnih istraživanja gdje se uglavnom promatra utjecaj agregata i njihove distribucije na čvrstoću betona. Meddah i sur. (2010) istraživali su utjecaj agregata na tlačnu čvrstoću betona te zaključili da je tlačna čvrstoća betona u jakoj korelaciji sa parametrima agregata (masenom udjelu, omjeru manjih i većih agregata, distribuciji agregata po veličini). Ajamu i Ige (2015) su proučavali utjecaj veličine agregata na tlačnu i savojnu čvrstoću betonske grede. Zaključili su da beton sa većim agregatima ima višu tlačnu čvrstoću, a nižu savojnu. Čvrstoća betona ovisna o raznim

parametrima simulira se i numeričkim metodama gdje se beton često modelira samo kao smjesa agregata i matrice (mezoskopska razina) što omogućuje detaljnije proučavanje heterogenosti smjese i njenog utjecaja na čvrstoću betona ((Kim & Abu Al-Rub, 2011; Pedersen, Simone, & Sluys, 2013)).

2.4.1. Matematički modeli betonskog bloka

Očigledno je da je numerički pristup određivanja slučajnih ulaznih parametara sustava, zbog izvodljivosti i točnosti, najprikladniji te će se u ovom radu koristiti za određivanje distribucije ulaznih parametara koji utječu na proces direktne montaže. Naime, cilj je konstruirati matematički eksperiment direktne montaže koji kao izlaz ima prethodno spomenutu distribuciju ulaznih parametara.

Modeliranje betonskog bloka na mezoskopskoj razini moguće je na nekoliko načina:

- Algoritamski pristup
- Metodom konačnih elemenata
- Diskretnim metodama

Najjednostavniji, ali ujedno i najmanje detaljan je zasigurno algoritamski pristup kojim se u preddefiniranom prostoru smještaju agregati različitih dimenzija. Betonski blok modeliran samo agregatima u prostoru može za izlaz imati samo distribuciju parametara kojima je uzrok agregat. Navedeni pristup koristio je Zheng i sur. (Zheng, Li, & Jones, 2003) pri određivanju distribucije agregata u betonu temeljenu samo na matematičkom problemu koji se javlja na rubu betona zbog oplata i nemogućnosti agregata da prijeđe oplatu. Valja napomenuti da sile koje utječu na distribuciju agregata nisu uzete u obzir. Qian i sur. (Qian, Garboczi, Ye, & Schlangen, 2016) razvili su tzv. Anm geometrijski model betona na mezoskopskoj razini. Anm model postavlja agregate neregularnog oblika u prethodno definirani prostor te se nakon modeliranja može koristiti u računalnim simulacijama kako bi se izračunala svojstva modela.

Metoda konačnih elemenata, modeliranjem materijala matrice i agregata, može dati više informacija od algoritamskog pristupa, ali je kompleksnija za implementaciju. Kim i Al-Rub (Kim & Abu Al-Rub, 2011) napravili su 2D i 3D mezoskopski model betonskog bloka kako bi analizirali plastično oštećenje betonskog bloka. Tijekom proučavanja 3D betonskog bloka, smanjena je fizička veličina bloka kako bi se smanjila računalna zahtjevnost. To je ujedno i najveći nedostatak matematičkog modela opisanog metodom konačnih elemenata: računalno su puno zahtjevniji od algoritamskog pristupa.

Hentz i sur. (Hentz, Daudeville, & Donzé, 2004) modelirali su i dokazali mogućnost modeliranja betona pomoću 3D metode diskretnih elemenata. Proučavali su elastično ponašanje, maksimalnu tlačnu i vlačnu čvrstoću te deformaciju, energiju loma te ostale karakteristike betona. Metoda diskretnih elemenata vrlo dobro opisuje dinamičke slučajeve te stoga predstavlja preciznu, ali računalno zahtjevnu metodu.

2.4.2. Distribucija agregata u betonskom bloku

Sa ciljem realne reprezentacije stvarnog eksperimenta i modeliranja što realnijeg betonskog bloka, uputno je pronaći distribuciju agregata u betonskom bloku. Distribuciju agregata moguće je odrediti simulacijom procesa lijevanja svježe smjese betona u betonskom bloku. Metodom diskretnih elemenata može se, na mezoskopskoj razini, vrlo dobro opisati proces lijevanja betona. Mechtcherine i Shyshko (Mechtcherine & Shyshko, 2015) su metodom diskretnih elemenata simulirali ponašanje svježe smjese betona tijekom različitih procesa lijevanja te pri tome dobili oblik betona nakon lijevanja bez vibracija vrlo sličan analitičkom modelu. Mechtcherine i sur. (Mechtcherine et al., 2013) napomenuli su da je proces lijevanja betona računalno zahtjevan te je stoga moguće simulirati samo kritične dijelove procesa lijevanja. Zbog računalne zahtjevnosti te relativno dugog vremena implementacije metode diskretnih elemenata, istraživači pri proučavanju betonskog bloka češće koriste eksperimentalne metode kao što su: računalna tomografija betonskog bloka ili obrada slike presjeka betona. Wong i Chau (Wong & Chau, 2005) su pomoću računalne tomografije proučavali anizotropnost betonskih cilindara i pritom nisu pronašli nikakve veće anizotropnosti betona niti u horizontalnoj niti u vertikalnoj ravnini. Han i sur. (Han, Wang, Wang, & Monteiro, 2016) su obradom digitalne RGB slike proučavali udaljenost između agregata, distribuciju po veličini, obliku i orijentaciji na 5 različitih betonskih smjesa. Zaključili su sljedeće:

- U svim proučavanim smjesama javlja se segregacija agregata
- Agregati manjih dimenzija su više obli
- Sve proučavane smjese imaju sličnu distribuciju agregata s obzirom na njihovu veličinu
- Ne postoji tendencija za orijentacijom agregata.

Safawi i sur. (Safawi, Iwaki, & Miura, 2004) istražili su utjecaj vibracija na visoko-fluidni beton te su zaključili da je segregacija agregata ovisna o trajanju vibracija tijekom procesa proizvodnje betonskog bloka. Dodatno su zaključili da je utjecaj vibracije na segregaciju izraženiji kod većih agregata (u odnosu na manje).

Iz navedenog je moguće zaključiti da je distribucija agregata u betonskom bloku ovisna o brojnim parametrima te je potrebno analizirati specifičan betonski blok i za njega odrediti distribuciju agregata. Kako je cilj predložiti metodologiju analize distribucije agregata u industrijskom okruženju, pri analizi koristit će se obrada slike presjeka betonskog bloka.

2.4.3. Obrada slike presjeka betonskog bloka

Presjek betona, zbog svoje heterogenosti i varijacije boja agregata, predstavlja izazov pri obradi slike za raspoznavanje agregata. Han i sur. (Han et al., 2016) su pri obradi digitalne RGB slike presjeka betonskog bloka ukazali na problem prepoznavanja više agregata kao jedan. RGB sliku transformirali su u monokromatsku sliku te tada proveli algoritam koji raspoznaje agregate ovisno o vrijednosti piksela na monokromatskoj slici. Algoritam je nekoliko agregata raspoznao kao jedan koje su pomoću ručnog pregledavanja te algoritma za eroziju odvojili na stvarne agregate. Algoritam koji prepoznaje rub agregata baziran na razlici u vrijednostima susjednih piksela monokromatske slike koristili su Feng i sur. (Feng, Xu, Xia, Jin, & Jin, 2016). Monokromatsku sliku proučavali su i Fang i Labi (Fang & Labi, 2007) pri analizi segregacije kod ojačanog samo-konsolidirajućeg betona. Predložili su algoritam za prepoznavanje agregata na crno-bijeloj slici koji susjedne piksele istih vrijednosti označuje sa istom oznakom. Önal i sur. (Önal, Özden, & Felekoğlu, 2008) koristili su tri različita načina pri obradi slike presjeka betonskog bloka:

- Prepoznavanje agregata ovisno o vrijednosti piksela na monokromatskoj razini
- Prepoznavanje praznina ovisno o nijansi boje u L^*a^*b prostoru boja
- Odvajanje spojenih agregata tzv. *Watershed* algoritmom

(Ozen & Guler, 2014) su nakon rezanja betonskog bloka nanijeli otopinu fenolftaleina na presjek kako bi povećali kontrast između agregata i matrice. Zatim su pomoću konvencionalnog skenera snimili monokromatsku sliku presjeka betonskog bloka te proveli obradu slike. Također su razvili algoritam za određivanje granične vrijednosti piksela između agregata i matrice. Metodu za poboljšanje kontrasta između matrice i agregata predložili su i Breul i sur. (Breul, Geoffray, & Haddani, 2008) pri procjeni segregacije agregata u betonu izrađenom na gradilištu. Oni su prethodno izbušenu površinu tretirali vodom i vazelinom. Oba načina dala su daleko bolji kontrast između agregata i matrice s tim da je vazelin dao bolji kontrast od vode. Računalno poboljšanje kontrasta između matrice i agregata koristio je Joshi (Joshi, 2014) pri analizi monokromatskih CT slika betonskih cilindara.

2.5. Implikacija za rad

SFEM metode su najčešće korištene numeričke simulacije za opisivanje stohastičkih slučajeva. U njima se distribucija ulaznog parametra može određivati s nekoliko različitih principa međutim, često se distribucija ulaznog parametra linearizira i na taj način promatra ponašanje proizvoda.

Numerički matematički modeli betonskog bloka mogu detaljno opisati betonski blok te odrediti distribuciju agregata, međutim računalno su zahtjevniji od ostalih metoda. Stoga, kod određivanja distribucije agregata, autori često koriste eksperimentalne metode (CT skeniranje, obrada slike) kojima je moguće analizirati distribuciju za specifičan blok. Obrada slike je zbog velikog broja razvijenih algoritama te jednostavnosti upotrebe postavljena za metodu kojom će se analizirati distribucija agregata.

Pregledom literature postavile su se osnove za detaljno definiranje problema i konstruiranje metodologije te se dala ideja o očekivanim rezultatima analize distribucije što je i prodiskutirano u idućim poglavljima.

3. Detaljna definicija problema

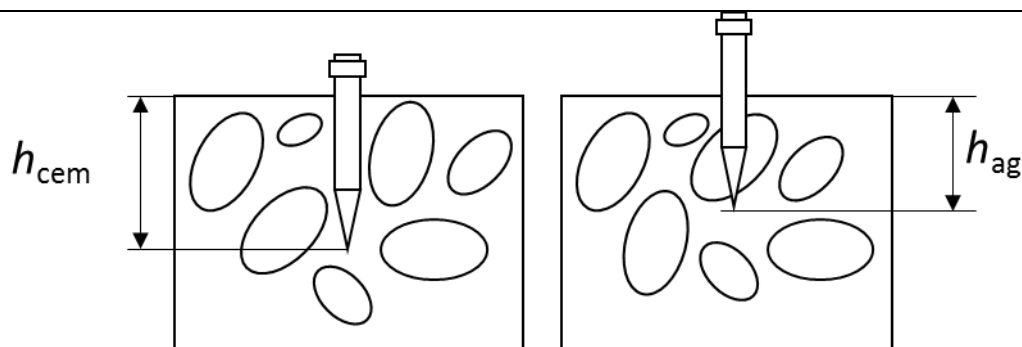
Drugi dio deskriptivne analize daje teorijska razmatranja o utjecajnim faktorima na procesu direktne montaže te rezultira definiranim stohastičkim parametrima za koje će se, metodologijom predloženom u idućem poglavlju, odrediti distribucija.

3.1. Utjecajni faktori na proces direktne montaže

Prijašnjim istraživanjima u industriji utvrđeni su utjecajni faktori kod procesa direktne montaže u beton: (Hilti, 2015)

- Dubini prodiranja čavla,
- Tlačnoj čvrstoći betona,
- Udaljenosti između već obavljene direktne montaže,
- Udaljenosti od ruba betona,
- Promjeru čavla te
- Agregatima u betonu.

Na proces direktne montaže utječu razni parametri, međutim vrlo je lako zaključiti da su najveći uzrok agregati. Naime, većina agregata ima veću tvrdoću nego matrica betona što otežava daljnje prodiranje čavla u beton tj. agregat. Ako i dođe do prodiranja čavla u agregat, znatan dio kinetičke energije čavla iskoristi se za lomljenje pogođenog agregata te je ostatak energije u čavlu nedovoljan za prodiranje u beton do dubine koju čavao dosegne kada ne udari u agregat (Slika 3.1). Naravno, dubina prodiranja ovisi i o tlačnoj čvrstoći betona koja također ovisi o količini i veličini agregata. Ajamu i Ige (Ajamu & Ige, 2015), Vilan i Sabelo (Vilane & Sabelo, 2016) te Kozul i Darwin (Kozul & Darwin, 1997) samo su neki od istraživača koji su proučavali utjecaj agregata na tlačnu čvrstoću betona. Ukratko, njihov zaključak govori da veličina, količina i materijal agregata utječu na tlačnu čvrstoću betona. U navedenim radovima pokazano je da agregati utječu i na ostale parametre kao npr. čvrstoću loma, savojnu čvrstoću itd. što samo pokazuje važnost razumijevanja betona, s posebnim naglaskom na agregat, kao materijala u procesu razvoja geometrije čavla.



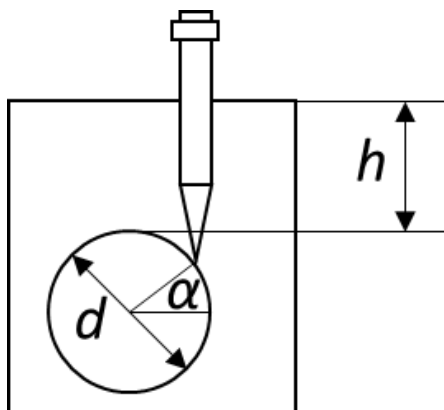
Slika 3.1 Utjecaj agregata na dubinu prodiranja čavla

3.2. Parametri interakcije čavla i agregata

Pogleda li se beton na mezoskopskoj razini, tlačna čvrstoća betona gubi svoj smisao te ju je potrebno promatrati lokalno tj. posebno za agregate, a posebno za matricu. Na toj razini, tlačna čvrstoća betona ne može utjecati na kvalitetu direktne montaže odnosno njen utjecaj je obuhvaćen agregatima koje čavao pri montaži pogodi (razlika u tlačnoj čvrstoći agregata i matrice). Stoga se može zaključiti da kvaliteta direktne montaže primarno ovisi o količini izgubljene kinetičke energije čavla (savijanje čavla, prodiranje čavla kroz tvrdi agregat itd) te je potrebno pronaći parametre interakcije čavla i agregata koji utječu na smanjenje kinetičke energije čavla. Pristupi li se problemu na najjednostavniji mogući način i geometrija agregata opiše sa sferama, moguće je definirati jedan materijalni i tri geometrijska parametra koji bi mogli utjecati na promjenu kinetičke energije čavla. Materijalni parametar predstavlja vrstu agregata kojeg čavao pogodi. Tvrdoća i energija loma različitih materijala agregata znatno variraju te ih je potrebno uzeti u obzir međutim, radi smanjenja dimenzije stohastičkog polja materijalni parametar interakcije neće biti proučavan u ovome radu nego će se kao pretpostavka uzeti da su agregati od materijala s najvećom energijom loma – granita.

Geometrijski parametri nisu toliko očiti te ih je potrebno pretpostaviti. Uzme li se najjednostavniji slučaj interakcije čavla i agregata s pretpostavljenim sfernim agregatima, tri parametra mogu biti pretpostavljena (Slika 3.2). U ovom trenutku, tj. za prvi iteracijski ciklus istraživanja, može se pretpostaviti da su ovo korektno definirani parametri i da se njima može opisati utjecaj agregata (tj. pretpostavlja se tzv. „hard problem definition“).

Nadalje, kako je vjerojatnost da dva slučaja direktne montaže imaju jednake vrijednosti geometrijskih parametara interakcije čavla i agregata gotovo jednaka nuli, za potrebe SFE metode nije moguće odrediti najčešće ili karakteristične slučajeve već je potrebno odrediti distribuciju geometrijskih parametara unutar njihovih rubnih vrijednosti.

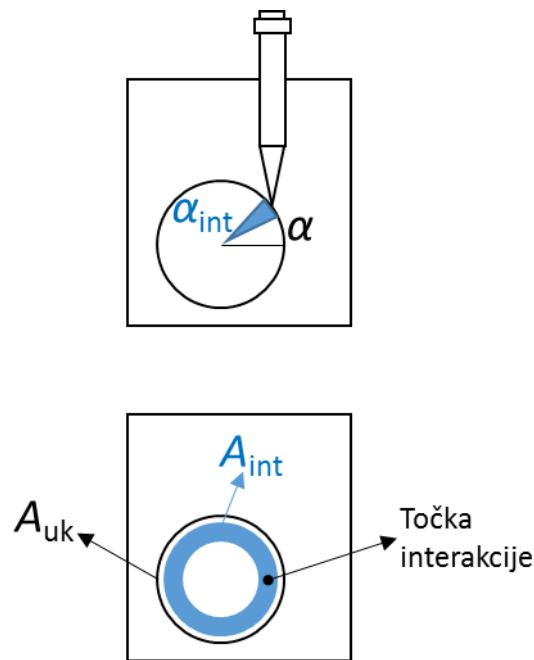


Slika 3.2 Pretpostavljeni geometrijski parametri interakcije čavla i agregata

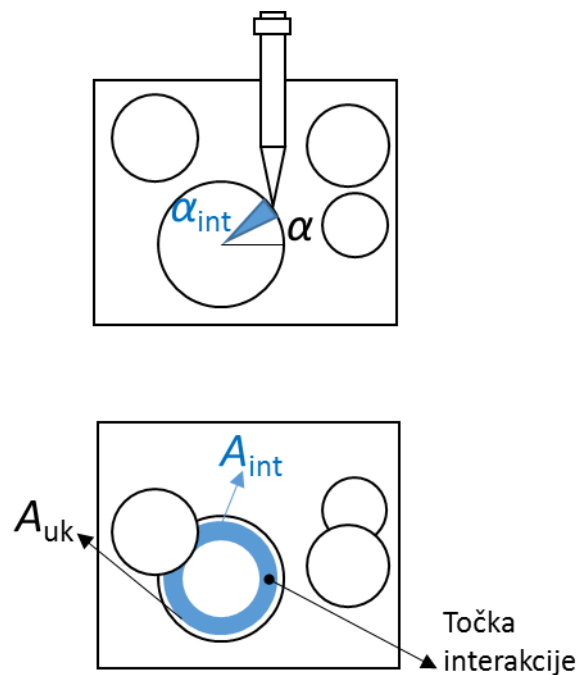
Parametri interakcije biti će ulazne varijable u SFE metodu kojoj će cilj biti provesti analizu više različitih geometrija čavala te tako poboljšati geometriju trenutnog čavla, ali i povećati opseg znanja o proizvodu i njegovom ponašanju u operativnim uvjetima.

3.3. Određivanje distribucije geometrijskih parametara

Geometrijski parametri imaju oblik koji je u praksi obično vrlo lako mjeriti: dvije duljinske mjere i jedna kutna. Međutim, navedene mjere fizikalno je nemoguće mjeriti jer su svi parametri „skriveni“ tj. cijeli sustav (čavao, agregat, matrica) čini kruti sklop koji onemogućuje upotrebu konvencionalnih mjernih uređaja. Stoga je potrebno naći alternativan pristup za mjerenje geometrijskih parametara. Jedan od najočitijih pristupa jest pretpostaviti matematički definiranu distribuciju navedenih parametara baziranu na prijašnjim istraživanjima ili matematičkoj teoriji (analitički) Promotri li se npr. kut udaranja agregata, vrlo je lako izvesti distribuciju navedenog parametra (Slika 3.3). Dovoljno je samo podijeliti geometrijski parametar na veći broj intervala malih podintervalnih područja (npr. 90 intervala sa podintervalnim područjem od 1°) te zatim za svaki interval izračunati omjer između površine intervala i ukupne površine projekcije agregata. Dobiveni omjeri predstavljaju funkciju gustoće vjerojatnosti. Međutim, na slici 3.4 prikazan je problem koji se javlja zbog velikog broja agregata u sustavu koji nisu pogođeni, ali svojom pojavom prikrivaju područje mogućih kuteva te time kompliciraju analitičko izvođenje parametra. Slično se događa i s ostalim parametrima tj. sustav postaje prekompleksan za analitičko određivanje problema što ostavlja dva načina određivanja distribucije parametara: eksperimentalno ili numerički.



Slika 3.3 Matematičko određivanje geometrijskog parametra - kut



Slika 3.4 Kompleksnost matematičkog određivanja geometrijskih parametara - kut

Eksperimentalni način, koji bi se sastojao u proučavanju geometrijskih parametara zabijenih čavala je, kao što je to rečeno u poglavlju 2, preskup i prespor način. Naime, prvo je potrebno obaviti eksperiment koji bi sadržavao veći broj direktno montiranih čavala, a zatim razviti

metodu za određivanje parametara (CT skeniranje, ultrazvuk (upitno), ili mehanički izvlačenjem samo čavla te određivanja interakcije). Cijena, vrijeme i pouzdanost ovakvog načina određivanja geometrijskih parametara proporcionalna je broju uzoraka direktno montiranih čavala.

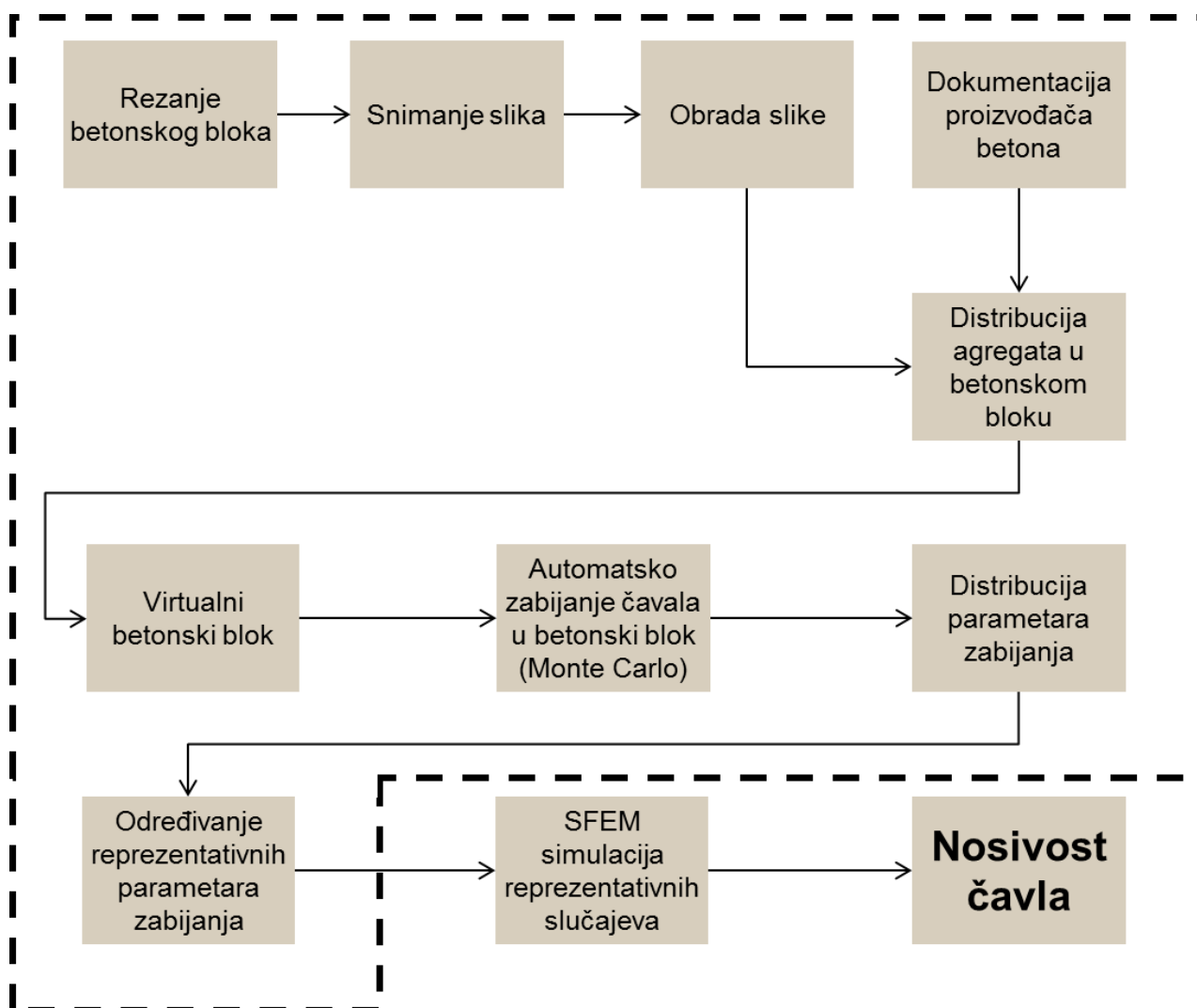
Numerički način, koji bi koristio jednu od metoda računalnog prikupljanja podataka eksperimenta, omogućuje prikupljanje velikog broja podataka bez značajnog povećanja cijene i vremena. Međutim, numerički način zahtjeva puno dulju implementaciju prvog ciklusa istraživanja jer je potrebno razviti eksperiment u računalnom obliku. Eksperiment bi se sastojao od virtualnog betonskog bloka na mezoskopskoj razini te direktnom montažom čavala iz kojeg bi se automatski iščitavali geometrijski parametri interakcije čavla i agregata. Razvoj i implementacija ovakvog načina određivanja geometrijskih parametara mogla bi biti i vremenski dulja i cjenovno skuplja od eksperimentalnog načina sa manjim brojem uzoraka. Međutim, fleksibilnost metode, jednostavno povećanje broja uzoraka, kraći ponovljeni ciklus procesa (jer nema ponovnog razvoja) te relativno lako poboljšanje metode daju prednost numeričkoj metodi nad eksperimentalnom i stoga će se u ovom radu razviti numerička metoda za određivanje distribucije geometrijskih parametara interakcije čavla i agregata.

3.4. Distribucija agregata u betonskom bloku

Pri izradi betonskog bloka, uvijek se pokušava dobiti maksimalno slučajna distribucija bez segregacija agregata međutim, zbog razlike u gustoći matrice i agregata, vibracija i ostalih utjecaja često se javlja segregacija. Mnogi autori su opisali navedenu pojavu (poglavlje 2) iz čijih se radova može zaključiti da je segregacija svojstvo betonskog bloka, odnosno potrebno je definirati jedan betonski blok i na njemu vršiti sve daljnje analize čavla. Također, jasno je da se pri ispitivanjima u razvoju proizvoda koriste isti uvjeti kako bi se smanjio vanjski utjecaj na eksperiment. Tako će se i pri razvoju čavla kao eksperiment koristiti uvijek isti betonski blok te se stoga razvija potreba za jednostavnom i jeftinom metodologijom kojom će se pronaći distribucija agregata u preddefiniranom betonskom bloku koji se koristi pri ispitivanju proizvoda, odnosno čavla. S obzirom na ograničene resurse, distribucija agregata u betonskom bloku istražiti će se pomoću obrade slike presjeka betonskog bloka.

4. Predložena metodologija određivanja parametara

Nakon pregleda literature i definicije problema moguće je razviti metodologiju kojom će se, pri parametarskom konstruiranju čavla, odrediti distribucija te reprezentativne vrijednosti nekontroliranih parametara koji utječu na proces direktne montaže za definiranje problema. Definirane vrijednosti parametara koristiti će se pri determinističkoj FEM simulaciji kako bi se odredio parametar za vrednovanje čavla – nosivost čavla (Slika 4.1). Uokvireni dio procesa biti će prikazan i razvijen u idućim poglavljima ovoga rada.



Slika 4.1 Proces razvoja čavla pomoću SFEM metode

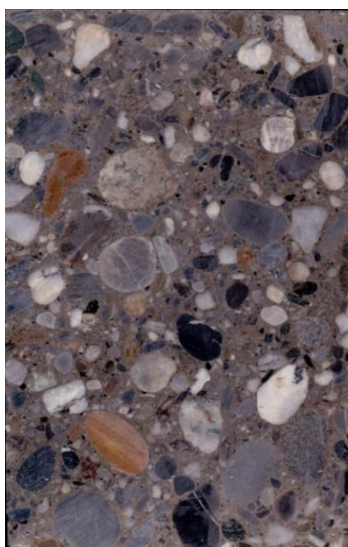
4.1. Rezanje betonskog bloka

Prije rezanja betonskog bloka, potrebno je definirati područja interesantna istraživaču te na temelju njih odrediti mjesta rezanja betonskog bloka kako bi se uzeli uzorci. Sam način rezanja betonskog bloka nije od velike važnosti te ostaje na odabir provoditelju eksperimenta. Pri odabiru uzoraka, valja imati na umu da broj uzoraka direktno utječe na rezultate analize te da idući korak ima ograničenja na veličinu i težinu uzorka. Nakon rezanja, uzorke je potrebno očistiti čistom vodom kako bi snimanje slika bilo efikasno.

4.2. Snimanje slika

Snimanje slika vrši se standardnim A4 skenerom kako bi se smanjio utjecaj pozadinskog svjetla koji pri obradi slike stvara šum. Neposredno prije skeniranja, uzorak je potrebno tretirati vodom u obliku spreja kako bi se povećao kontrast između agregata i matrice.

Skeniranje se vrši u prostoru boja koji se koristi kod skenera – RGB prostoru boja, rezolucijom od 600 ppi koja daje sliku optimalne kvalitete za obradu slike algoritmom razvijenom u sljedećem poglavlju. Prilikom skeniranja potrebno je zapamtiti orijentaciju uzorka kako bi prilikom statističke analize sve slike bile orijentirane na isti način. Skenirane slike spremaju se u *.jpeg* formatu koji podržava RGB prostor boja. Prije daljnje obrade, slike je ručnim alatom (npr. Paint.NET¹) potrebno odrezati na dimenzije uzorka, tako da konačna slika sadrži samo matricu i agregate (Slika 4.2).



Slika 4.2 Konačna slika nakon procesa skeniranja

¹ Paint.NET – dotPDN, LLC (<http://www.getpaint.net/index.html>)

4.3. Obrada slike skeniranih presjeka betonskog bloka

Snimljene slike u RGB formatu potrebno je transformirati u binarnu sliku (agregati – 1; matrica – 0) koja je potrebna za proces statističke analize. U tu svrhu, pomoću programskog paketa MATLAB² razvijen je kod za obradu RGB slike betonskog bloka. Kod se sastoji od dva principa prepoznavanja agregata:

- Prepoznavanje rubova agregata na principu operatora razlika u snazi (DIS – *eng.* Difference in Strength) (Feng et al., 2016)
- Prepoznavanje agregata na temelju boje u HSB (*eng.* Hue, Saturation, Brightness) prostoru boja.

Kako je boja matrice heterogena (Slika 4.3 – lijevo), algoritam za prepoznavanje rubove definira veliki broj rubova na mjestu matrice dok na mjestu agregata, zbog njihove homogenosti u boji, prepoznaje znatno manji broj rubova. Međutim, neki agregati nemaju homogenu boju te ih algoritam ne prepoznaje dobro (Slika 4.3 – sredina). Algoritam prepoznavanja rubova je:

1. Podijeliti sliku u manje dijelove (sekcije)
2. Za svaki sloj slike (crveni, zeleni i plavi) pojačati kontrast koristeći izjednačavanje histograma
3. Smanjiti šum slike koristeći 3D Gaussov filter
4. Za svaki piksel svakog sloja slike izračunati DIS vrijednosti osim za zadnja dva retka i stupca (nisu izvedivi)
5. Izračunati prosječnu DIS vrijednost za svaki sloj slike i pomnožiti ga s graničnim faktorom
6. Za svaki piksel zbrojiti koliko slojeva slike ima DIS vrijednost iznad granične
7. Ako je broj slojeva slika sa DIS vrijednosti iznad granične veći od graničnog broja slojeva slike, piksel se označuje kao rub
8. Spojiti sekcije kako bi se formirala cijela slika
9. Primjeniti filtere za smanjenje šuma slike, obrisati agregate koji imaju preveliku površinu za korisnikove potrebe.

Algoritam za prepoznavanje agregata na temelju boje koristi relativno ujednačenu boju matrice kako bi istu razdijelio od agregata. Algoritam je:

1. Transformirati sliku iz RGB prostora boja u HSB prostor boja

² MATLAB – MathWorks, Bern, Switzerland (<https://ch.mathworks.com/>)

2. Za svaki piksel provjeriti zadovoljava li se uvjet

$$H_D < H < H_G \quad (4.1)$$

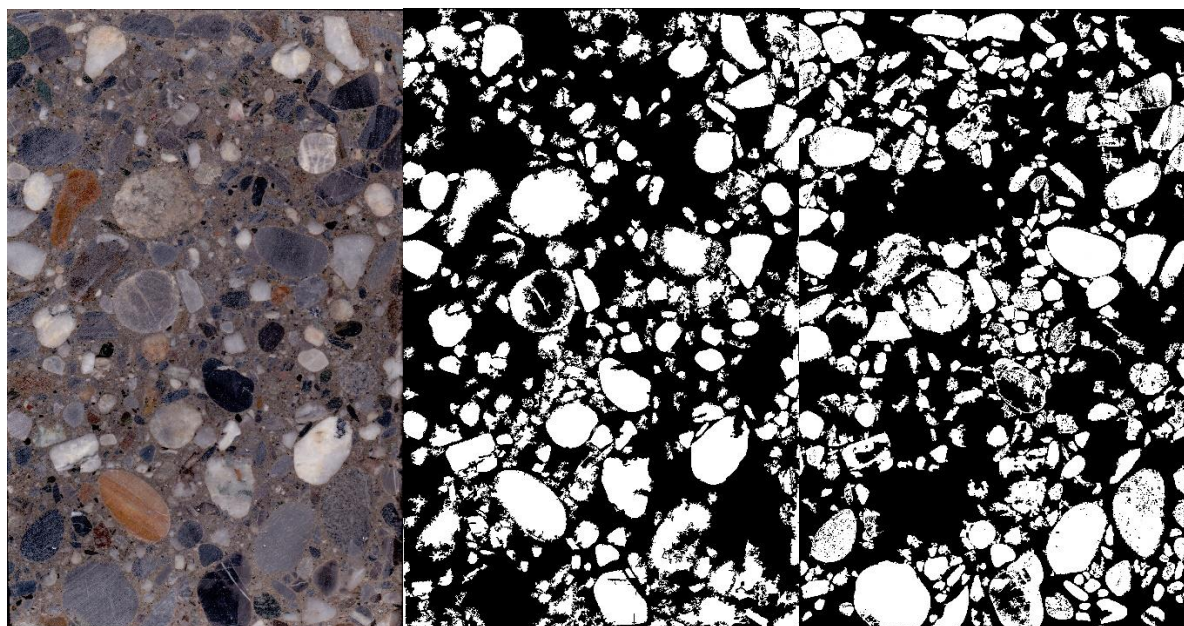
&

$$B > B_{\min} , \quad (4.2)$$

gdje su vrijednosti H_D , H_G i B_{\min} definirane od strane korisnika

3. Ako je uvjet iz točke 2 zadovoljen, definiraj piksel kao agregat.
4. Primjeniti filtere za smanjenje šuma slike, obrisati agregate koji imaju premalu površinu za korisnikove potrebe.

(Slika 4.3 – desno) prikazuje primjer rezultirajuće slike algoritma za prepoznavanje agregata na temelju boje iz koje je vidljivo da se ovim algoritmom mogu vrlo dobro prepoznati agregati kojima je vrijednost nijanse i vrijednost svjetline različita od matrice.



Slika 4.3 Rezultat algoritma prepoznavanja rubova – lijevo i algoritma prepoznavanja boja – desno

Nakon obrade slike s oba pristupa, rezultati su spojeni u jednu sliku gdje je algoritam spajanja sljedeći:

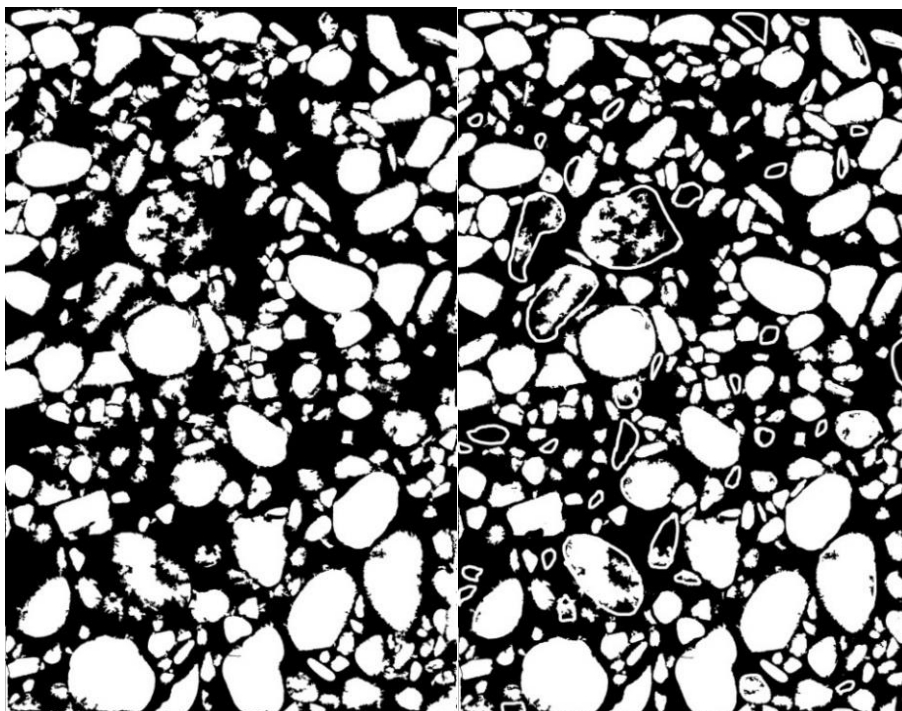
1. Koristi sliku dobivenu na principu boje kao temeljnu sliku
2. Za svaki piksel matrice na temeljnoj slici, postavi vrijednost piksela na slici dobivenoj na principu prepoznavanja rubova

3. Primjeniti filtere za odvajanje spojenih agregata, obrisati agregate koji imaju premalu površinu za korisnikove potrebe.

Iako proces obrade slike koristi dva različita principa za prepoznavanje agregata i dalje postoje nedostaci koje je, nakon računalne obrade (Slika 4.4 - lijevo), potrebno ručno popraviti kako bi rezultati stohastičke analize bili vjerodostojni. Za tu svrhu koristi se Paint.NET³ ili slično programsko sučelje te je proces ručnog popravljivanja sljedeći:

1. Otvoriti originalnu sliku u RGB prostoru boja
2. Dodati finalnu binarnu sliku (Slika 4.4 - lijevo) kao sloj
3. Promijeniti prozirnost dodanog sloja (vrijednost oko 70)
4. Koristiti kist s crnom bojom za odvajanje agregata ili brisanje nepostojećih agregata
5. Koristiti kist s bijelom bojom za dodavanje agregata koji nisu prepoznati (crtanje vanjskog obrisa je dovoljno).

Nakon provedenog procesa ručne korekcije, slike imaju oblik prikazan na slici 4.4 - desno i moguće ih je u takvom obliku koristiti u idućem koraku metodologije.



Slika 4.4 Spojena slika dva pristupa – lijevo i finalna slika nakon ručne korekcije - desno

³ Paint.NET – dotPDN, LLC (<http://www.getpaint.net/index.html>)

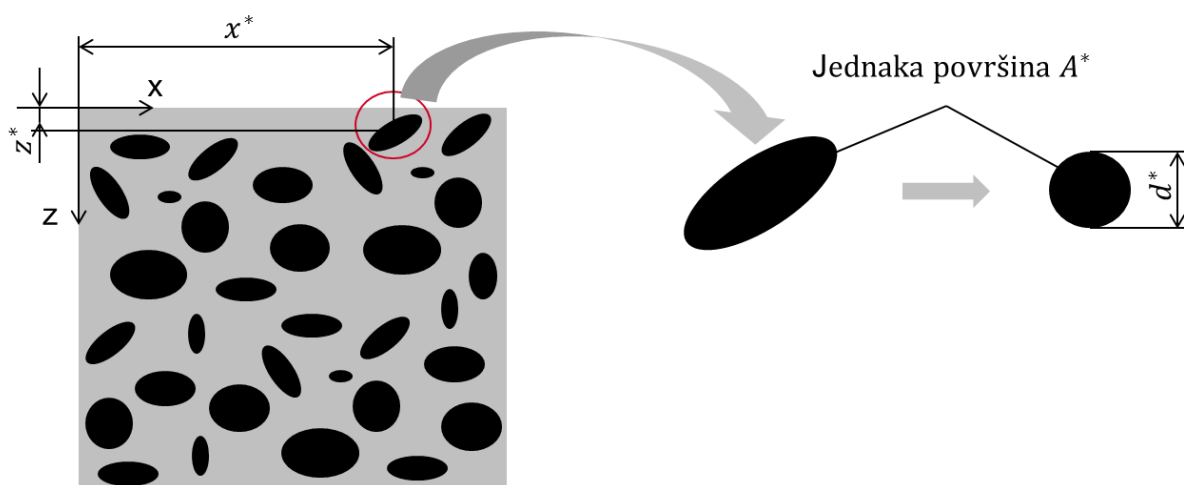
4.4. Statistička analiza obrađenih slika

Najveći nedostatak 2D analize distribucije je nedostatak treće dimenzije te je istu potrebno uvesti upotrebom vjerojatnosti kako bi se približilo rezultatima stvarne distribucije agregata. Uvođenjem treće dimenzije, svrsishodno je razlikovati varijable koje se opisuju agregat u 2D prostoru i agregat u 3D prostoru. Tako će sve varijable koje su vezane uz presjek (2D prostor) imati uz oznaku i asterisk simbol (*).

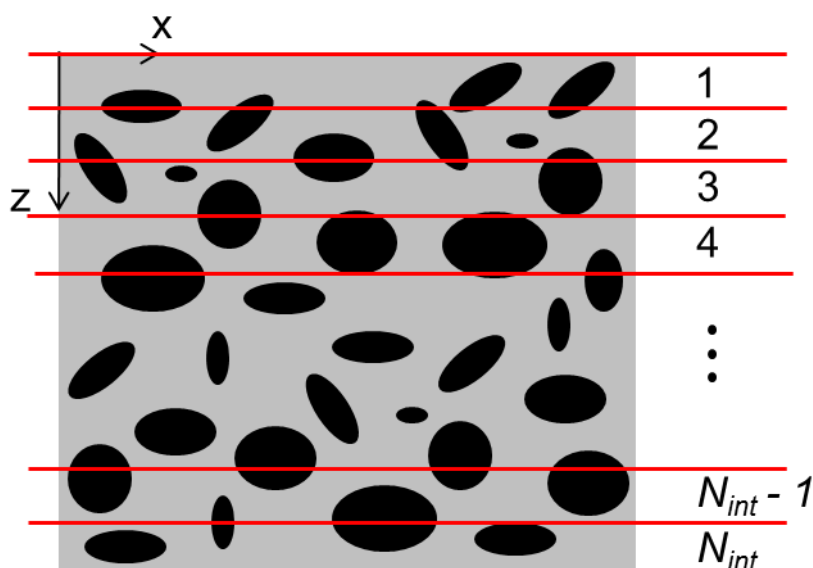
Prije analize i vjerojatnosti, potrebno je sa binarnih slika preuzeti potrebne statističke podatke o veličini i poziciji agregata. Tako će se sa binarnih slika preuzimati (Slika 4.5):

- Površina presjeka agregata (A^*)
- Pozicija težišta površine presjeka agregata (x^* i z^*)

Za klasifikaciju po veličini agregata koristiti će se ekvivalentan promjer (d^*) kao mjera izvedena iz mjere površine agregata (A^*) (Slika 4.5). Kod promatranja pozicije agregata, koristiti će se intervali (dubine kod vertikalnog proučavanja i udaljenosti od oplata kod horizontalnog proćavanja) u koje će biti smješteni svi agregati kojima je težište unutar krajnjih granica intervala (Slika 4.6).



Slika 4.5 Značajke agregata



Slika 4.6 Intervali za promatranje pozicije agregata

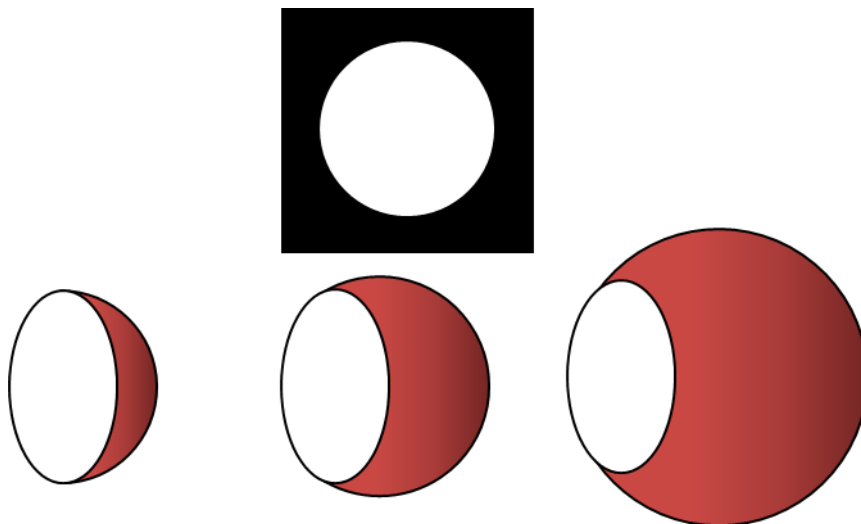
Slika 4.7 prikazuje kako analiza 2D slika može utjecati na rezultate analiza. Ako se pretpostavi da su svi agregati sfere, iza svakog presjeka agregata (Slika 4.7 - gore) može biti agregat bilo koje veličine jednakog ili većeg promjera (Slika 4.7 - dolje) od presjeka na 2D slici. Nastavi li se s analizom bez rješavanja navedenog problema, distribucija će rezultirati većim brojem manjih agregata i manjim brojem većih agregata. Stoga se mora pretpostaviti veličina agregata ovisno o vjerojatnosti njegove pojave. Naime, matematička formulacija za bilo koji oblik agregata osim sfere postaje vrlo komplicirana te će se stoga, za analizu vjerojatnosti, veličine i pozicije agregata koristiti sferni oblik agregata s poprečnim presjekom promjera definiranog prema slici 4.5. Sa sfernim oblikom agregata, moguće je izračunati vjerojatnosti da poprečan presjek (d^*) zapravo pripada većem agregatu (d) i tako smanjiti ukupnu grešku procesa analize 2D slika. U ovom radu pokazan je pristup računanju vjerojatnosti koji se bazira na uvjetovanoj vjerojatnosti:

$$P(d | d^*) = \frac{P(d \cap d^*)}{P(d^*)} \quad (4.3)$$

koja može biti izražena i riječima:

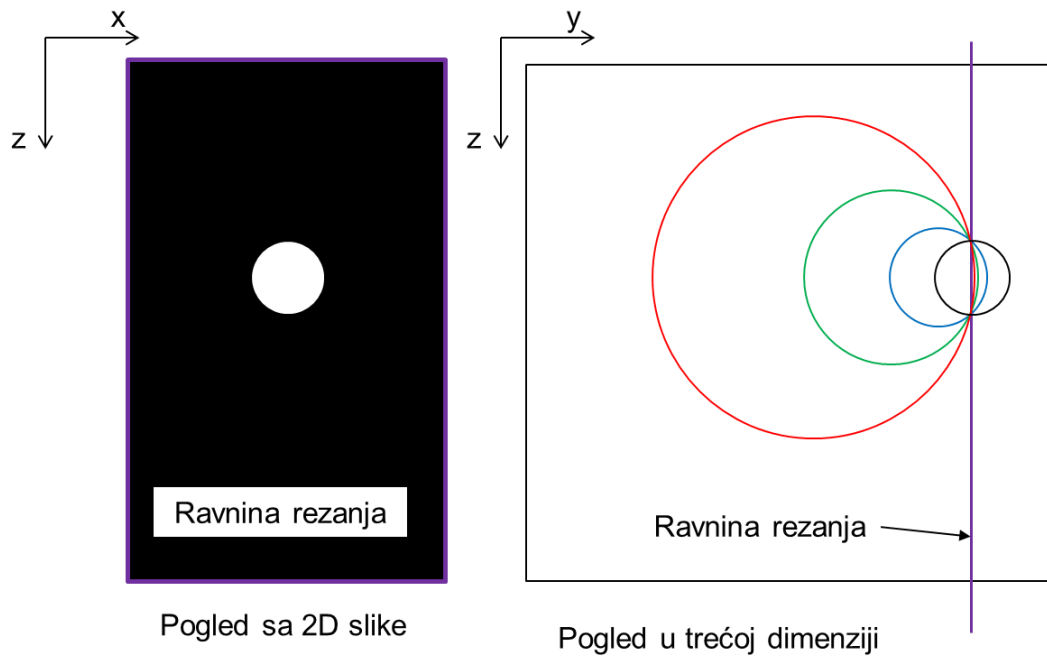
Ako je na slici vidljiv ekvivalentan promjer d^* , vjerojatnost da promjer pripada agregatu s promjerom d jednaka je vjerojatnosti da se dogode oba slučaja (unija promjera agregata d i ekvivalentnog promjera d^*) podijeljena s vjerojatnošću da je odrezan ekvivalentni promjer d^* .

Naravno, vjerojatnost da je odrezan ekvivalentni promjer d^* jednaka je nuli te uvjetna vjerojatnost ne može biti direktno izračunata. Međutim, sa razumijevanjem sustava moguće je vjerojatnosti izvesti bez korištenja osnovne jednadžbe uvjetovane vjerojatnosti (4.3).

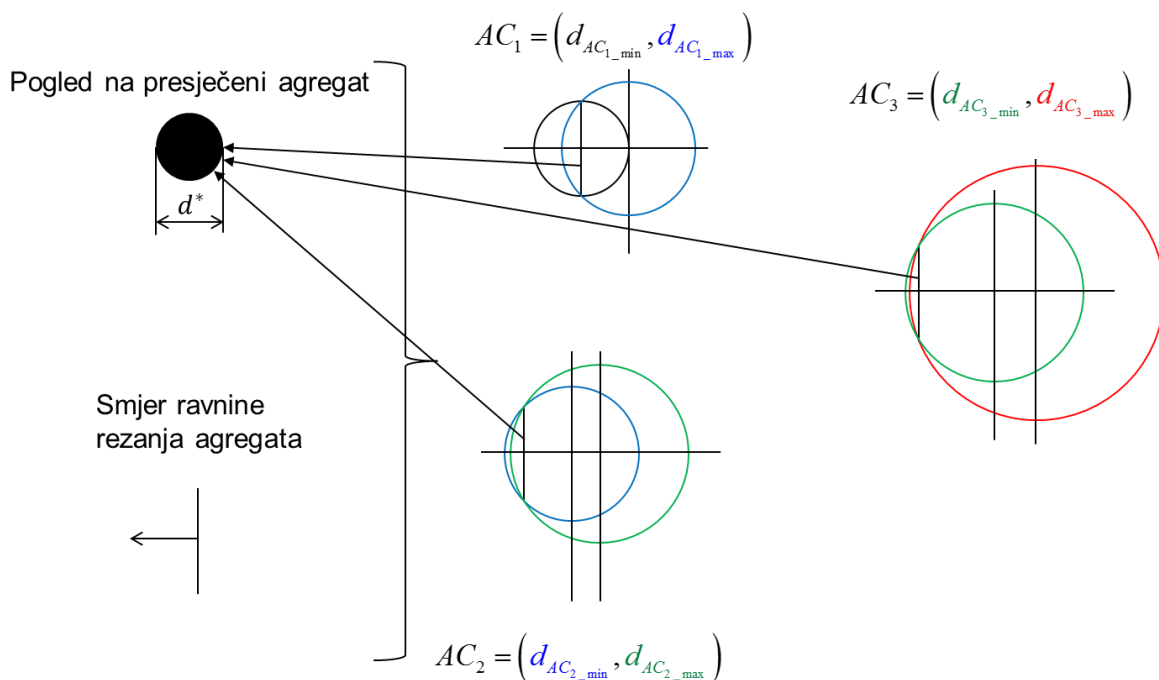


Slika 4.7 Nedostatak 2D analize betonskog bloka

Promotri li se slučaj eksperimenta kada je u betonskom bloku samo jedan agregat (Slika 4.8) moguće je doći do nekoliko zaključaka. Sa pretpostavkom sfernih agregata, vidljivo je da sve veličine mogućih agregata imaju iste koordinate središta u ravnini 2D slike te da se uvođenjem vjerojatnosti mijenja vrijednost samo treće koordinate. Time je moguće zaključiti da vjerojatnosti neće utjecati na poziciju agregata u ravnini slike i da se i dalje mogu pratiti vrijednosti pozicije agregata. Proučavanjem središta različitih veličina agregata, moguće je dodatno zaključiti da parametar vjerojatnosti mora biti jednodimenzionalan jer se središte pomiče samo u jednoj dimenziji. Dakle, potrebno je definirati jednodimenzionalni parametar na temelju kojeg će se računati vjerojatnosti da je agregat ekvivalentnog promjera d^* zapravo dio agregata promjera d . Računanje navedenih vjerojatnosti nije izvedivo jer bi se za svaki promjer agregata $d \geq d^* \cap d \leq d_{max}$ trebala znati vjerojatnost u betonskom bloku. Kako proizvođači iz praktičnih razloga klasiraju veličinu agregata u intervale kojima je definiran minimalni i maksimalni promjer agregata (klase agregata AC_j gdje je j redni broj klase agregata) te definiraju njihov maseni udio, a time i vjerojatnost pojavljivanja klase agregata (AC_j), jednodimenzionalni parametar će definirati vjerojatnosti da je agregat ekvivalentnog promjera d^* zapravo dio klase agregata AC_j (Slika 4.9), odnosno $P(AC_j | d^*)$.



Slika 4.8 Moguće veličine agregata iz jednog presjeka



Slika 4.9 Minimalni i maksimalni promjer klasa agregata sa istim presjekom agregata

Očito je da jednodimenzionalni parametar ima ovisnost o poziciji središta maksimalnog i minimalnog promjera agregata iz klase $AC_j(l_{d^*}^{AC_j})$. Naime, što je veća udaljenost središta

maksimalnog i minimalnog promjera agregata iz klase AC_j u odnosu na zbroj udaljenosti središta svih klasa agregata, veća je vjerojatnost da agregat ekvivalentnog promjera d^* pripada klasi agregata AC_j (Slika 4.10). Matematički se to može zapisati:

$$P_{d^*}^{AC_j} = \frac{l_{d^*}^{AC_j}}{\sum_{i=AC_1}^{AC_{\text{last}}} l_{d^*}^i} . \quad (4.4)$$

Navedena jednadžba vjerojatnosti bila bi točna kada bi broj agregata u svakoj klasi agregata AC_j bio jednak. Kako se u većini slučajeva broj agregata u svakoj klasi agregata AC_j razlikuje, a ovisi o masenom udjelu klase agregata propisanom od strane proizvođača betona, moguće je korigirati jednadžbu i dobiti konačnu jednadžbu za izračun vjerojatnosti:

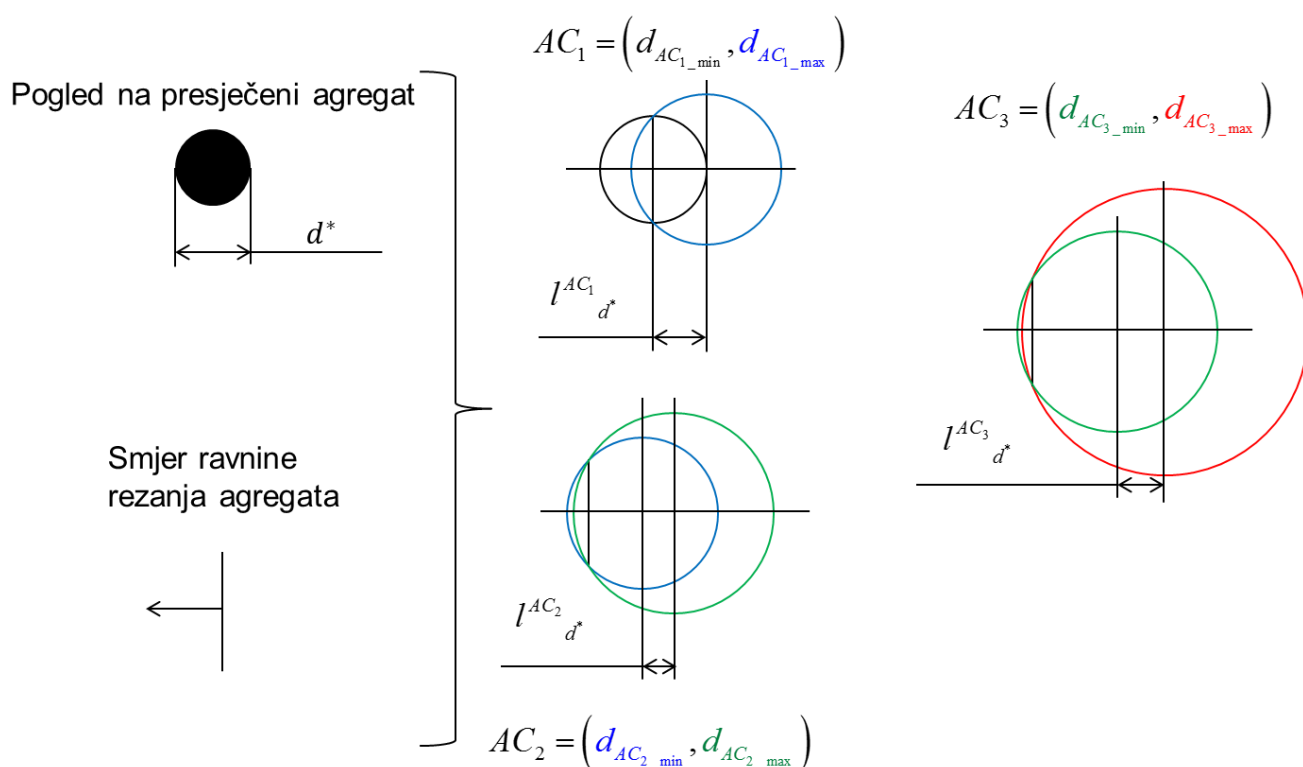
$$P_{d^*}^{AC_j} = \frac{n_{AC_j} \cdot l_{d^*}^{AC_j}}{\sum_{i=AC_1}^{AC_{\text{last}}} (n_i \cdot l_{d^*}^i)} \quad (4.5)$$

Gdje n predstavlja broj agregata unutar određene klase agregata koji se može odrediti poznavajući maseni udio klase agregata

$$n_{AC_j} = \frac{m_{AC_j}}{\rho_{\text{ag}} \cdot V_{AC_j}} \quad (4.6)$$

Gdje je V_{AC_j} volumen prosječne veličine agregata u AC_j koja, ovisno o proizvođaču betona, može biti ili aritmetička sredina ili neka druga srednja vrijednost.

Nakon što su sve vjerojatnosti, tj. vjerojatnosti za svaki agregat na slici izračunate, formira se tablica vjerojatnosti u kojoj je za svaki agregat zapisan interval pozicije te vjerojatnosti za svaku klasu agregata AC_j (Tablica 4.1). Zbroj vjerojatnosti svakog retka jednak je 1 jer agregat viđen na slici mora biti dio jedne od klasa agregata.



Slika 4.10 Definiranje parametra vjerojatnosti

Tablica 4.1 Primjer izlaznih vjerojatnosti za 4 AC intervala

Ekvivalentni promjer agregata	Interval pozicije	AC_j			
		0-4	4-8	8-16	16-32
d^*_1	1	$P^{0-4}_{d^*_1}$	$P^{4-8}_{d^*_1}$	$P^{8-16}_{d^*_1}$	$P^{16-32}_{d^*_1}$
d^*_2	N_{int}	$P^{0-4}_{d^*_2}$	$P^{4-8}_{d^*_2}$	$P^{8-16}_{d^*_2}$	$P^{16-32}_{d^*_2}$
d^*_3	2	$P^{0-4}_{d^*_3}$	$P^{4-8}_{d^*_3}$	$P^{8-16}_{d^*_3}$	$P^{16-32}_{d^*_3}$
...
d^*_{last}	1	$P^{0-4}_{d^*_{\text{last}}}$	$P^{4-8}_{d^*_{\text{last}}}$	$P^{8-16}_{d^*_{\text{last}}}$	$P^{16-32}_{d^*_{\text{last}}}$

Iz tablice 4.1 moguće je dobiti broj agregata za sve klase agregata na svakom intervalu pozicije. Potrebno je samo zbrojiti vrijednosti vjerojatnosti za odgovarajući interval pozicije i

odgovarajuću klasu agregata AC_j (Tablica 4.2). Jasno je da u tablici 4.1 vrijednosti vjerojatnosti nisu cijeli brojevi (zbroy svakog retka jednak je jedan jer jedan agregat sa slike ne može predstavljati veći ili manji broj agregata) te stoga vrijednosti u tablici 4.2 ne moraju biti cijeli brojevi.

Tablica 4.2 Izračunavanje broj agregata na određenoj dubini

Interval pozicije	AC_j			
	0-4	4-8	8-16	16-32
1	$P^{0-4} d_{*1}^*$ + $P^{0-4} d_{*last}^*$ + ...	$P^{4-8} d_{*1}^*$ + $P^{4-8} d_{*last}^*$ + ...	$P^{8-16} d_{*1}^*$ + $P^{8-16} d_{*last}^*$ + ...	$P^{16-32} d_{*1}^*$ + $P^{16-32} d_{*last}^*$ + ...
2	$P^{0-4} d_{*3}^* + \dots$	$P^{4-8} d_{*3}^* + \dots$	$P^{8-16} d_{*3}^* + \dots$	$P^{16-32} d_{*3}^* + \dots$
...
N_{int}	$P^{0-4} d_{*2}^* + \dots$	$P^{4-8} d_{*2}^* + \dots$	$P^{8-16} d_{*2}^* + \dots$	$P^{16-32} d_{*2}^* + \dots$
Ukupno	$\sum_{i=1}^{last} P_{d_i^*}^{0-4}$	$\sum_{i=1}^{last} P_{d_i^*}^{4-8}$	$\sum_{i=1}^{last} P_{d_i^*}^{8-16}$	$\sum_{i=1}^{last} P_{d_i^*}^{16-32}$

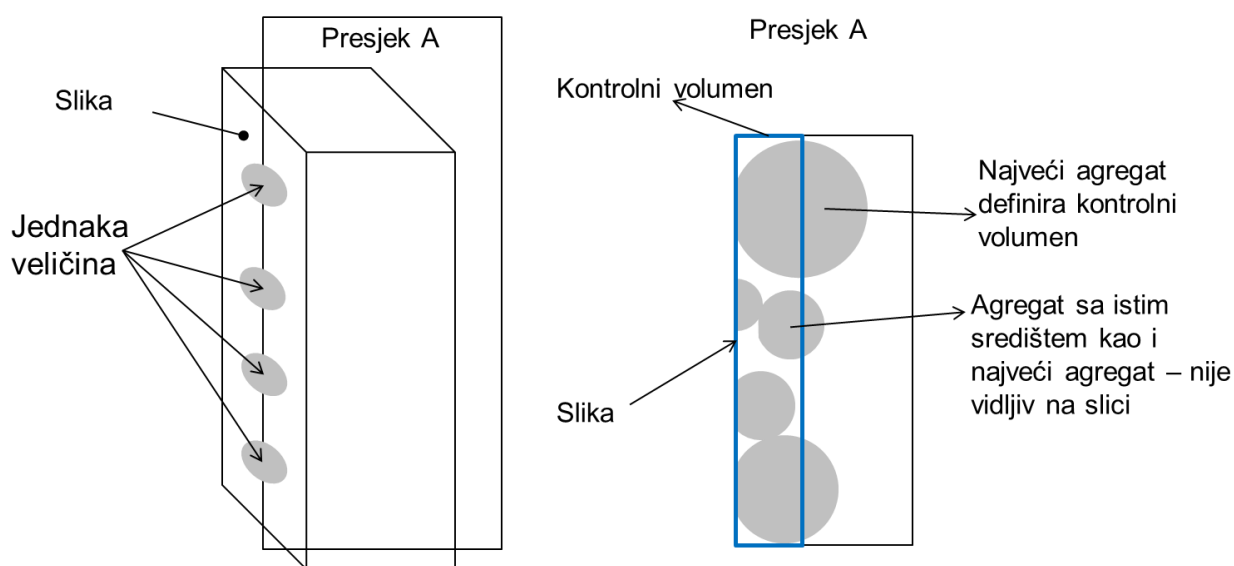
Iako je provedena transformacija iz 2D u 3D, rezultati nemaju trodimenzionalni smisao jer nije definiran volumen koji predstavljaju. Stoga je za potpunu transformaciju u 3D potrebno definirati kontrolni volumen koji će predstavljati volumen gdje je poznata točna distribucija i broj agregata svake klase agregata AC_j . Kontrolni volumen je, kako bi se u obzir uzeli svi prepoznati agregati, definiran u trećoj dimenziji kao najveća udaljenost središta agregata od ravnine u kojoj je snimljena slika (Slika 4.11). Ovim pristupom nedostajat će agregati manjeg promjera kojima je središte unutar kontrolnog volumena, a nisu presječeni ravninom rezanja odnosno nisu vidljivi na slici (Slika 4.11) te isti trebaju biti dodani u izlaznu distribuciju. Pretpostavi li se da je u trećoj (izvedenoj) dimenziji distribucija konstantna, moguće je, iz proizvođačevih podataka o betonu, izračunati broj agregata svake klase agregata AC_j u kontrolnom volumenu:

$$n_{AC_j}^{KV} = V_{KV} \cdot \frac{m_{AC_j}}{\rho_{ag} \cdot V_{AC_j}} \quad (4.7)$$

Izračunati teorijski broj agregata svake klase agregata je tada podijeljen sa stvarnim brojem agregata iz uzoraka kako bi se dobio faktor kojim je potrebno uvećati broj agregata u kontrolnom volumenu:

$$E_{AC_j}^{KV} = \frac{n_{AC_j}^{KV}}{\sum_{i=1}^{last} P_{d_i^*}^{AC_j}} \quad (4.8)$$

Tada se, konačno, za dobivanje točne distribucije agregata u kontrolnom volumenu, vrijednosti iz tablice 4.2 množe sa faktorom uvećanja broja agregata u kontrolnom volumenu. Time je omjer između dvije klase agregata promijenjen (faktori uvećanja obično su veći za manje klase agregata) dok je omjer agregata po dubini unutar jedne klase agregata AC_j ostao nepromijenjen.



Slika 4.11 Definicija kontrolnog volumena

Tablica 4.3 prikazuje konačne izlazne vrijednosti statističke analize obrađenih slika koje se koriste za modeliranje virtualnog betonskog bloka.

Tablica 4.3 Izlazne vrijednosti statističke analize slika

Interval pozicije	AC_j		
	0-4	4-8	8-16
1	$E_{0-4}^{KV} \cdot (P_{d_1^*}^{0-4} + P_{d_{last}^*}^{0-4} + \dots)$	$E_{4-8}^{KV} \cdot (P_{d_1^*}^{4-8} + P_{d_{last}^*}^{4-8} + \dots)$	$E_{8-16}^{KV} \cdot (P_{d_1^*}^{8-16} + P_{d_{last}^*}^{8-16} + \dots)$
2	$E_{0-4}^{KV} \cdot (P_{d_3^*}^{0-4} + \dots)$	$E_{4-8}^{KV} \cdot (P_{d_3^*}^{4-8} + \dots)$	$E_{8-16}^{KV} \cdot (P_{d_3^*}^{8-16} + \dots)$
...
N_{int}	$E_{0-4}^{KV} \cdot (P_{d_2^*}^{0-4} + \dots)$	$E_{4-8}^{KV} \cdot (P_{d_2^*}^{4-8} + \dots)$	$E_{8-16}^{KV} \cdot (P_{d_2^*}^{8-16} + \dots)$

4.5. Modeliranje virtualnog betonskog bloka

Rezultati dobiveni analizom betonskog bloka služe kao osnova za izradu virtualnog betonskog bloka. Distribucija agregata analiziranog betonskog bloka opisana je Metodom diskretnih elemenata (DEM) kojom se modelira virtualni betonski blok (sadrži informacije o poziciji i veličini agregata). Pri modeliranju virtualnog betonskog bloka, moguće je koristiti i ostale pristupe opisani u pregledu literature.

4.6. Monte Carlo metoda procesa direktne montaže

Definiranim virtualnim betonskim blokom moguće je razviti Monte Carlo matematički model opisan u poglavlju 2 za simulaciju interakcije čavla i agregata kojim bi se simulirao eksperiment direktne montaže. U ovom koraku moguće je koristiti i druge metode uzorkovanja (LHS, kvazi-Monte Carlo i sl.), ali kako je i Monte Carlo algoritam dovoljno efikasan, nije bilo potrebe za daljnjim optimiranjem algoritma.

Algoritam sadrži sljedeće korake:

1. Slučajnim odabirom odabrati točku na dnu betonskog bloka
2. Definirati kontrolni volumen koji sadrži sve moguće agregate koji mogu biti pogođeni
3. Sortirati podatke o agregatima po dubini u kontrolnom volumenu

4. Pronaći prvu interakciju između čavla i agregata
5. Zapisati parametre interakcije u tablicu
6. Ponoviti proces za sljedeći čavao.

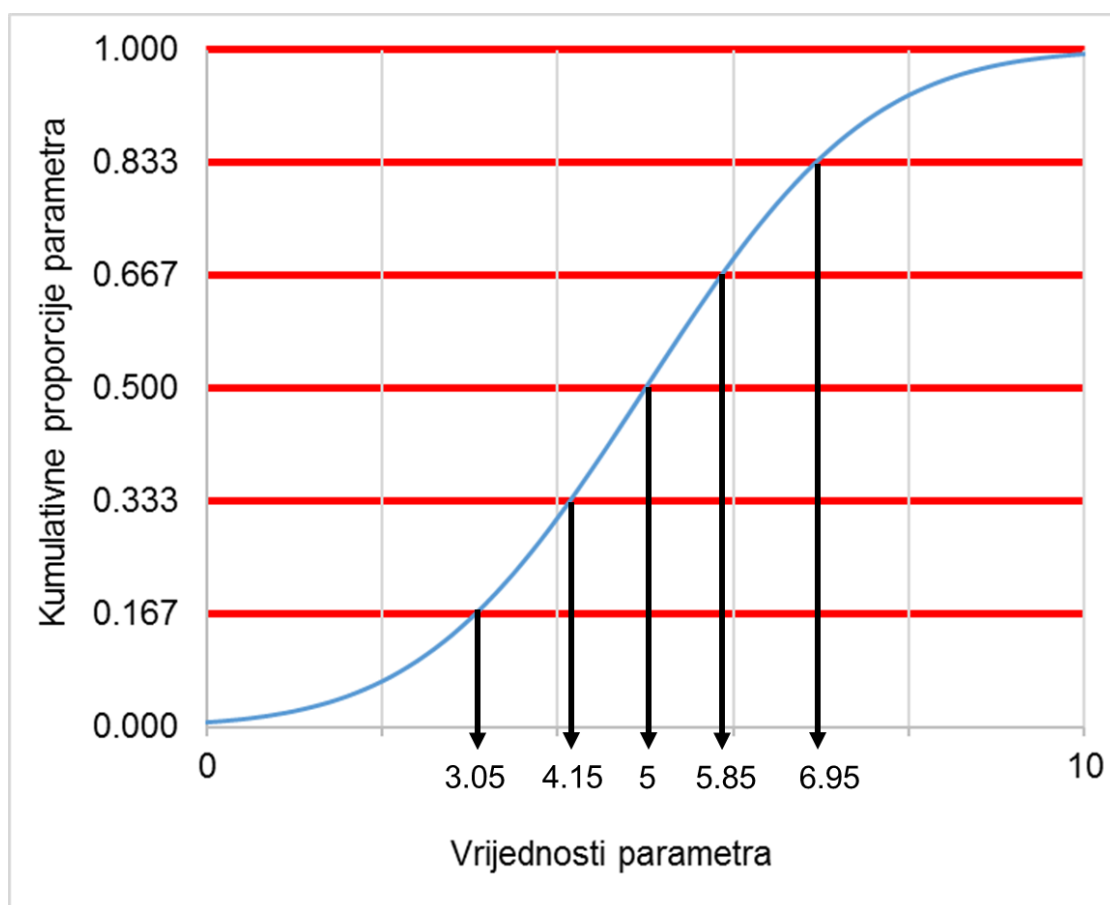
Navedeni proces potrebno je ponoviti dovoljan broj puta tako da daljnje povećanje veličine uzorka nema značajan utjecaj na distribuciju parametara interakcije.

4.7. Odabir reprezentativnih vrijednosti parametara interakcije

Izvršavati SFEM simulacije sa slučajno odabranim ulaznim parametrima zahtjevao bi veliki broj simulacija kojima bi se često premašili resursi namijenjeni istraživanju. Stoga je za primjenu SFEM analize u razvoju proizvoda korisno proučiti distribuciju ulaznih parametara. Trenutno, SFEM metodama mogu se analizirati samo distribucije sa niskom standardnom devijacijom, dok je distribucije sa velikim rasipanjem potrebno diskretizirati na efikasan način tako da se sa što manje diskretiziranih vrijednosti pokriva što veće područje distribucije. Ako je distribucija ulaznog parametra poznata/određena, moguće je razviti metodu kojom će se odabrati parametri bazirani na distribuciji i željenom broju reprezentativnih slučajeva. Ovisno o broju željenih reprezentativnih slučajeva poznata distribucija se, kao što je slučaj kod LHS metode, dijeli na broj intervala sa jednakom vjerojatnošću. Tada se iz svakog intervala kao reprezentativna vrijednost uzme medijan promatranog intervala što osigurava ekvivalentnu udaljenost reprezentativne vrijednosti od rubnih vrijednosti promatranog intervala.

Navedena metoda se može i drugačije objasniti: Za svaku kumulativnu distribuciju parametra odrediti $2 \cdot n_{RV}$ -kvantile te odrediti vrijednosti koji odgovaraju neparnim kvantilama. Dobivene vrijednosti predstavljaju reprezentativne slučajeve gdje svaki slučaj pokriva područje sa jednakom vjerojatnošću i do donje granice područja kojeg pokriva ima jednak kumulativni postotak kao i do gornje granice.

Primjer sa normalnom distribucijom ($\mu = 5; \sigma = 2$) pri određivanju 3 reprezentativna slučaja prikazan je na slici 4.1. U ovom primjeru, vrijednost parametra pridružen prvoj kvantili (3.05) predstavlja reprezentativni slučaj za cijeli interval od početka distribucije (0) do vrijednosti parametra pridruženog drugoj kvantili (4.15). Slično, vrijednost parametra pridruženog trećoj kvantili (5) predstavlja reprezentativni slučaj za cijeli interval od vrijednosti parametra pridruženog drugoj kvantili (4.15) do vrijednosti parametra pridruženog četvrtoj kvantili (5.85) itd.



Slika 4.12 Primjer određivanja reprezentativnih parametara predloženom metodom

Navedeni pristup određivanju reprezentativnih parametara primjenjuje se za svaki parametar interakcije zasebno. Dobivene vrijednosti potrebno je kombinirati nekim od metoda planiranja pokusa kako bi se dobila distribucija nosivosti čavla sa najmanjim mogućim brojem simulacija.

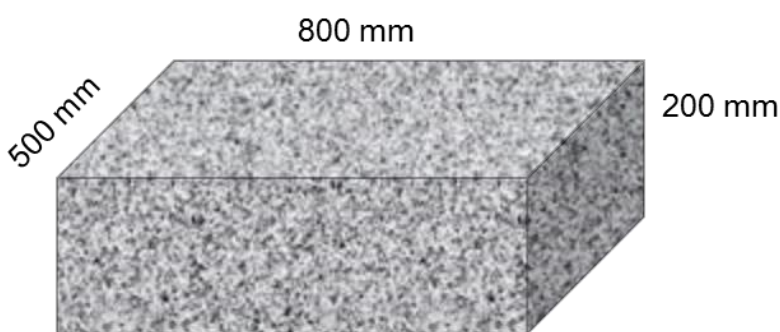
5. Eksperimentalni dio

U ovom poglavlju, biti će pokazan provedeni eksperiment u kojem će se analizirati distribucija agregata u preddefiniranom betonskom bloku, te na temelju nje modelirati virtualni betonski blok. Na virtualnom betonskom bloku će se zatim provesti Monte Carlo metoda procesa direktne montaže koja će rezultirati distribucijom parametara definiranih u poglavlju 3. Na temelju distribucije, odredit će se reprezentativne vrijednosti svakog od parametara te planiranjem eksperimenta odrediti slučajevi koji će predstavljati cijelu distribuciju parametara za definiranje problema. Slučajevi dobiveni na ovaj način, koristit će se u budućnosti u skupu determinističkih MKE simulacija kojima će se definirati vrijednost parametra za vrednovanje alternativa u parametarskom konstruiranju čavla.

5.1. Ulazni parametri eksperimenta

Proces izrade betonskog bloka sastoji se od miješanja sastojaka određenih masenih udjela, lijevanja heterogene smjese unutar oplate te vibriranja ljevačkog stola kako bi se popunio sav prostor određen oplatom. Tablica 5.1 prikazuje masene udjele (po 1 m^3) sastojaka analiziranog betonskog bloka dok Slika 5.1 prikazuje njegove dimenzije.

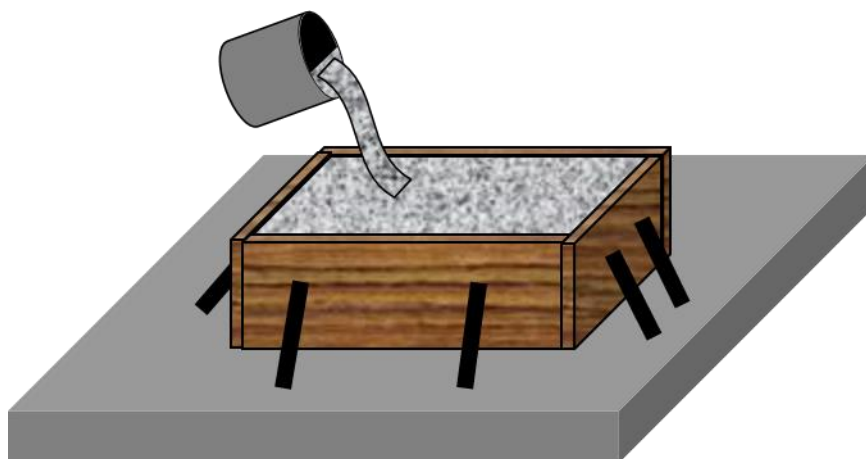
U poglavlju 3.4 opisana je potreba za definiranjem betonskog bloka odnosno uvjeta ispitivanja. Definirani blok potrebno je izraditi u kontroliranim uvjetima



Slika 5.1 Dimenzije betonskog bloka

Tablica 5.1 Analizirani betonski blok

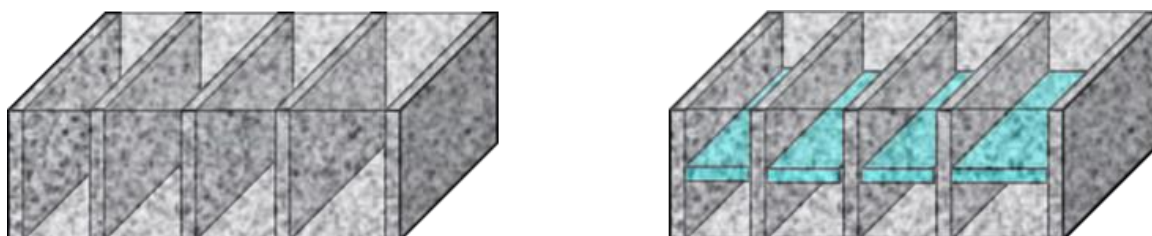
C 50/60 GK32	
Agregati 0-4 mm	32%; 637 kg
Agregati 4-8 mm	20%; 394 kg
Agregati 8-16 mm	22%; 433 kg
Agregati 16-32 mm	26%; 518 kg
Cement	325 kg
Voda	159 kg
Voda/cement omjer	0.489
Plastifikator	3.25 kg

**Slika 5.2 Oplata, vibracijska podloga i lijevanja betonskog bloka**

Betonski je blok nakon nekoliko dana izvađen iz oplata, a nakon nekoliko tjedana bio je spreman za prvi korak metodologije.

5.2. Rezanje betonskog bloka

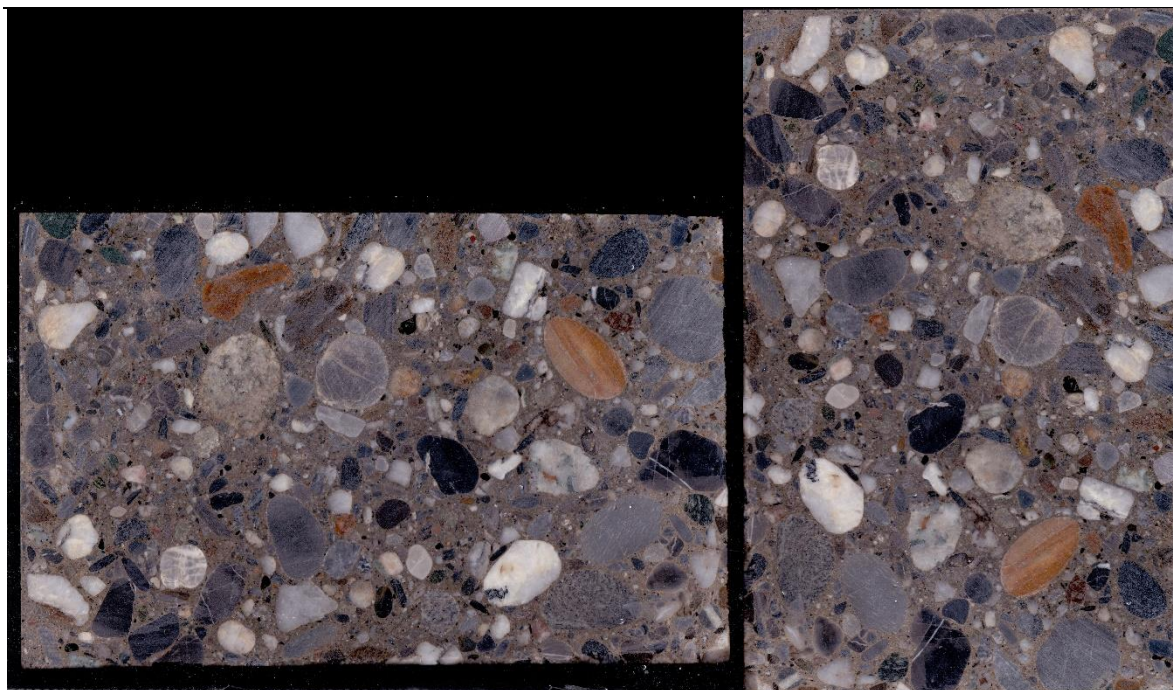
Betonski blok izrezan je dijamantnom pilom za beton tako da izrezani uzorci predstavljaju distribuciju na svim dijelovima betonskog bloka (Slika 5.3). Deset uzoraka (svaki uzorak je radi lakšeg rukovanja prepolovljen po sredini najdulje dimenzije) predstavlja distribuciju u vertikalnoj ravnini (Slika 5.3 – lijevo), dok osam (svaki uzorak je radi lakšeg rukovanja prepolovljen po sredini najdulje dimenzije) uzoraka predstavlja distribuciju u horizontalnoj ravnini (Slika 5.3 - desno). Tako izrezani uzorci oprani su čistom vodom te označeni kako bi bilo poznato koji dio betonskog bloka predstavljaju.



Slika 5.3 Uzorci za analizu distribucije agregata u vertikalnoj i horizontalnoj ravnini

5.3. Skeniranje uzoraka

Uzorci su zatim, neposredno prije skeniranja skenerom marke *HP*, modela *Scanjet 300* tretirani vodom u obliku spreja. Pri skeniranju, parametri skenera podešeni su vrijednostima opisanim u metodologiji te je praćena orijentacija uzoraka. Sve skenirane slike odrezane su ručnim alatom kako bi na slici bio samo presjek betonskog bloka te rotirane tako da gornji dio slike vertikalnim uzorcima predstavlja gornji dio betona, a horizontalnim uzorcima dio do oplata (Slika 5.4).



Slika 5.4 Rezanje i rotiranje skenirane slike

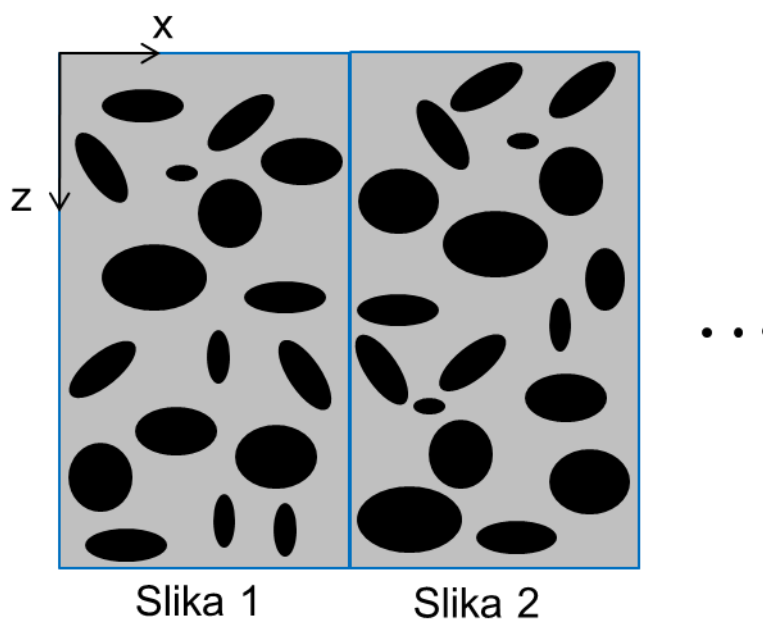
5.4. Obrada skeniranih slika

Deset vertikalnih i osam horizontalnih slika transformirani su u binarnu sliku pomoću algoritma opisanom u poglavlju 4.3 te je tada provedena ručna korekcija opisana u istom poglavlju. U istom poglavlju pokazan je, na primjeru slike koja se bitno ne razlikuje od slika dobivenih u eksperimentu (Slika 4.2, Slika 4.4), proces stvaranja binarne slike te izgled izlazne slike za statističku analizu. Valja napomenuti da su pri obradi slike svi agregati kojima je ekvivalentni promjer d^* jednak ili manji od 4 mm obrisani te se smatraju dijelom matrice jer su u standardima deklarirani kao pijesak (ASTM Committee C09.91, 2015; Hilti, 2015), odnosno njihov se utjecaj zanemaruje. Time je, zbog velikog broja agregata deklariranih kao pijesak, smanjen šum slike te se analiza može provesti za veće i po proces direktne montaže zanimljivije agregate. Binarne slike (10 vertikalnih i 8 horizontalnih) korištene su u statističkoj analizi za analizu distribucije.

5.5. Statistička analiza

Pri procesu statističke analize, praćena je distribucija samo u vertikalnom smjeru slike (z – koordinata na slici 4.6) te stoga postoje dvije vrste uzoraka: horizontalni i vertikalni. Naime, vertikalnim uzorcima praćena je distribucija agregata po dubini betonskog bloka, dok je horizontalnim uzorcima praćena distribucija agregata okomito na oplatu. Pretpostavlja se da je

utjecaj oplata u obje horizontalne koordinatne osi jednak. Statistička analiza je praćena tako da su rezultati svih slika (10 kod vertikalnih i 8 kod horizontalnih) spojeni kako bi se statistika temeljila na većem broju agregata. Kako je praćena distribucija samo u vertikalnom smjeru slike (z – koordinata na slici 4.6), slike je moguće spojiti u horizontalnom smjeru (x – koordinata na slici 4.6) te na taj način dobiti veliku sliku na kojoj će se temeljiti statistička analiza (Slika 5.5). Ovakva slika nije fizički spojena, već je samo na taj način kombinirana u algoritmu za statističku analizu.



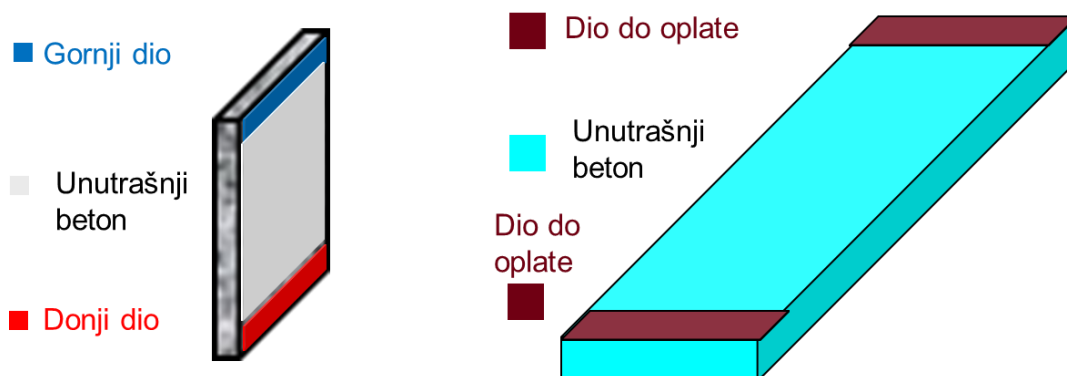
Slika 5.5 Kombiniranje rezultata različitih slika

Rezultati imaju karakteristične regije te je uputno navesti riječi koje će se koristiti za određeni dio betonskog bloka:

- Gornji dio – gornji dio betonskog bloka, slučaj kada korisnik obavlja direktnu montažu u pod.
- Donji dio – donji dio betonskog bloka, slučaj kada korisnik obavlja direktnu montažu u strop
- Unutrašnji beton – unutarnji dio betonskog bloka
- Dio do oplata – bočni dijelovi betonskog bloka, tj. dijelovi koji su bili u kontaktu s oplatom.

Pokraj svake slike rezultata biti će ikona koja će označavati na koji se dio betonskog bloka odnosi (Slika 5.6).

Rezultati distribucije prikazani su kao volumen agregata na određenom pozicijskom intervalu. Veličina pozicijskog intervala je 6 mm kako bi se dobila precizna distribucija u rubnim dijelovima betonskog bloka te u isto vrijeme smanjio šum koji bi nastao prevelikim brojem intervala jer bi svaki interval sadržavao mali broj agregata.



Slika 5.6 Ikone za vertikalne i horizontalne uzorke

5.6. Virtualni betonski blok

Virtualni betonski blok modelira se pomoću DEM metode pri čemu se pokušala dobiti distribucija agregata dobivena eksperimentom. Distribucije agregata dobivene eksperimentom dane su za tri klase agregata definirane od strane proizvođača (4-8 mm, 8-16 mm i 16-32 mm). Za svaku klasu agregata izračunao se broj agregata ovisno o intervalu pozicije u betonskom bloku. Za iste intervale pozicije i klase agregata proračunat je broj agregata dobiven DEM metodom. Rezultati su uspoređeni i njihovim poklapanjem nastavlja se sa procesom. Kao izlazna datoteka virtualnog betonskog bloka koristi se *.dat* u kojoj su sadržani radijusi i pozicije središta svakog agregata u virtualnom betonskom bloku.

5.7. Monte Carlo metoda procesa direktne montaže

Metoda opisana u poglavlju 4.6 primjenjena je na virtualni betonski blok. Broj procesa direktne montaže je 20000 čime se pretpostavlja da distribucija parametara interakcije neće imati grešku zbog premalog broja uzoraka. Rezultati su spremljeni u iste klase agregata kao i u prethodnom koraku kako bi kasnije bilo moguće promatrati utjecaj pojedinih klasa agregata definiranih od strane proizvođača.

5.8. Odabir reprezentativnih parametara

Monte Carlo metoda rezultira distribucijom parametara interakcije (d , h i α) za tri klase agregata, što je ukupno 9 dijagrama distribucija (po tri za svaki parametar interakcije). Za svaku od 9 distribucija primjenjuje se metoda opisana u poglavlju 4.7 sa definiranim brojem parametara $n_{RV} = 3$. Kako je broj parametara 3, potrebno je distribuciju podijeliti na $2 \cdot n_{RV} = 6$ kvantila te kao parametre interakcije uzeti vrijednosti parametara na neparnim kvantilama (1. kvantila – 16.67%, 3. kvantila – 50%, 5. kvantila – 83.33%). Povećanjem broja parametara, komplicira se idući korak koji definira kombinacije parametara interakcije kao ulazne vrijednosti u simulacije. Većim brojem diskretiziranih parametara interakcije rezultira većim brojem simulacija te bi proces bio neefikasan. Odabir reprezentativnih parametara rezultira s tri vrijednosti svakog od tri različita parametra za svaku od tri klase agregata.

5.9. Kombinacija parametara interakcije

Ulaz u numeričku simulaciju direktne montaže je kombinacija tri prethodno definirana parametra interakcije. Stoga je potrebno efikasno kombinirati parametre interakcije te definirati ulazne vrijednosti u numeričke simulacije. Najdetaljnija kombinacija jest potpuni faktorski plan gdje se svaka vrijednost jednog parametra interakcije kombinira sa svim ostalim vrijednostima ostalih parametara interakcije. Za svaku klasu agregata, parametri interakcije d i h kombiniraju se ovom metodom, dok je kut za svaku kombinaciju d i h , određen tako da se ne ponavlja niti na istoj dubini, niti za isti promjer (Tablica 5.2). Pretpostavlja se da je analizom devet definiranih simulacija moguće pretpostaviti performasne čavla za kombinaciju parametara interakcije koji nisu simulirani (preostalih 18). Navedenu pretpostavku potrebno je validirati analizom svih kombinacija te usporedbom rezultata sa rezultatima predložene kombinacije parametara.

Tablica 5.2 Planiranje pokusa za jednu klasu agregata

	d_1	d_2	d_3
h_1	α_1	α_2	α_3
h_2	α_3	α_1	α_2
h_3	α_2	α_3	α_1

6. Rezultati

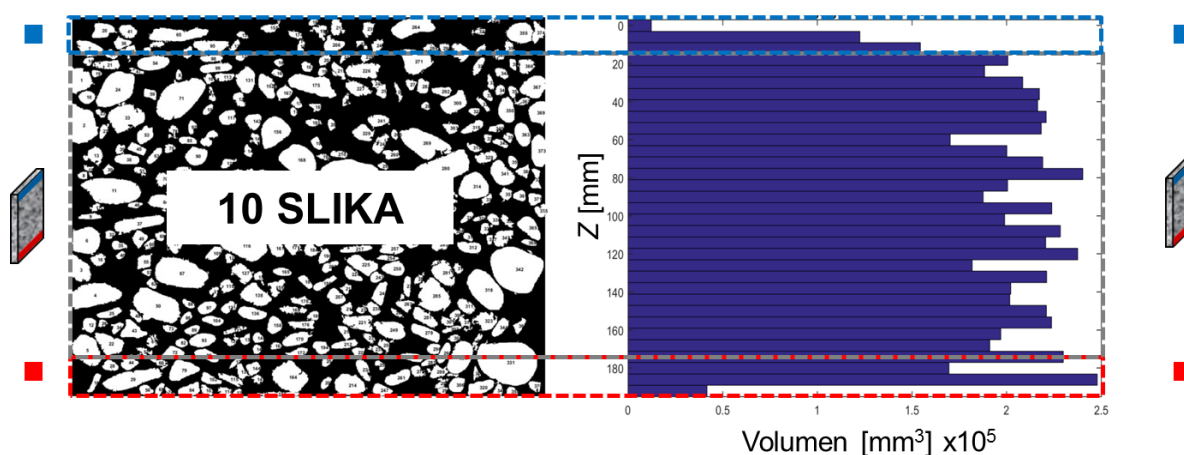
6.1. Distribucija u vertikalnoj ravnini

Zbrajanjem volumena agregata na svakom intervalu dubine, dobivenih transformacijom 2D rezultata analize slike u 3D rezultate (poglavlje 4.4), može se dobiti informacija o distribuciji agregata u vertikalnoj ravnini (Slika 6.1). Iz distribucije je vidljivo da je betonski blok moguće podijeliti u tri glavne regije:

1. Gornji dio betonskog bloka
2. Donji dio betonskog bloka
3. Unutrašnjost betonskog bloka

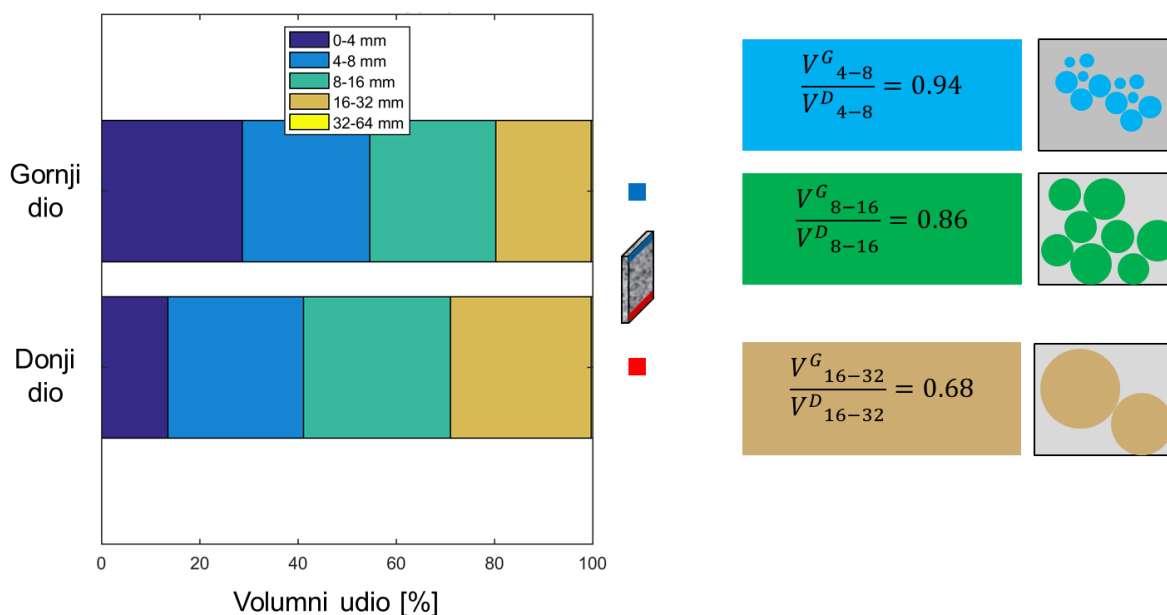
Gornji dio betonskog bloka ima smanjen volumen agregata od unutrašnjosti dok donji dio ima jednak ili veći volumen agregata što može dovesti do zaključka da u analiziranom betonskom bloku dolazi do segregacije agregata. Segregacija može biti jednostavno objašnjena kao razlika u gustoći između agregata i smjese vode i cementa. Donji dio betonskog bloka sadrži na kratkoj udaljenosti od dna maksimalni volumen agregata ($2.5 \times 10^5 \text{ mm}^3$). Razlog što maksimalan volumen nije na zadnjem intervalu leži u središnje orijentiranim rezultatima. Naime, veliki broj agregata dođe do dna betonskog bloka te ne mogu ići dublje. Tada je njihovo središte udaljeno od dna za vrijednost radijusa agregata.

1. Efekt gornjeg dijela betonskog bloka
2. Efekt donjeg dijela betonskog bloka
3. Unutrašnji dio betonskog bloka



Slika 6.1 Distribucija agregata u vertikalnoj ravnini

Kako je za direktnu montažu važan i gornji i donji dio betonskog bloka, detaljnija analiza navedenih područja je izvršena (30 mm dubine – maksimalna dubina čavala pri direktnoj montaži (Hilti, 2015)) (Slika 6.2). Ovdje je uputno reći da agregati kojima je promjer jednak ili manji od 4 mm predstavljaju matricu, odnosno polje 0-4 mm reprezentira matricu (cement+agregati 0-4 mm). Iz detaljnije analize rubnih područja, vidljivo je da je omjer volumena agregata u gornjem i donjem dijelu ovisan o klasi agregata. Naime, najmanji proučavani agregati (4-8 mm) imaju omjer volumena gornjeg i donjeg dijela 0.94 dok najveći proučavani agregati (16-32 mm) imaju omjer 0.68. Time se može zaključiti da svi agregati imaju tendenciju segregaciji (omjeri volumena su manji od 1) s tim da agregati većih dimenzija imaju veću tendenciju segregaciji. Hipoteza je da se izraženija segregacija većih agregata javlja zbog razlike između gravitacijske sile i Stokes-ove sile otpora. Gravitacijska sila je proporcionalna radijusu sfere s trećom potencijom, dok je Stokes-ova sila otpora linearno proporcionalna radijusu (“GünniX,” 2017). Nadalje, na istoj slici vidljivo je da je volumni udio agregata u donjem dijelu betonskog bloka za 15% veći od volumnog udjela agregata u gornjem dijelu.



Slika 6.2 Usporedba gornjeg i donjeg dijela betonskog bloka

6.2. Distribucija u horizontalnoj ravnini

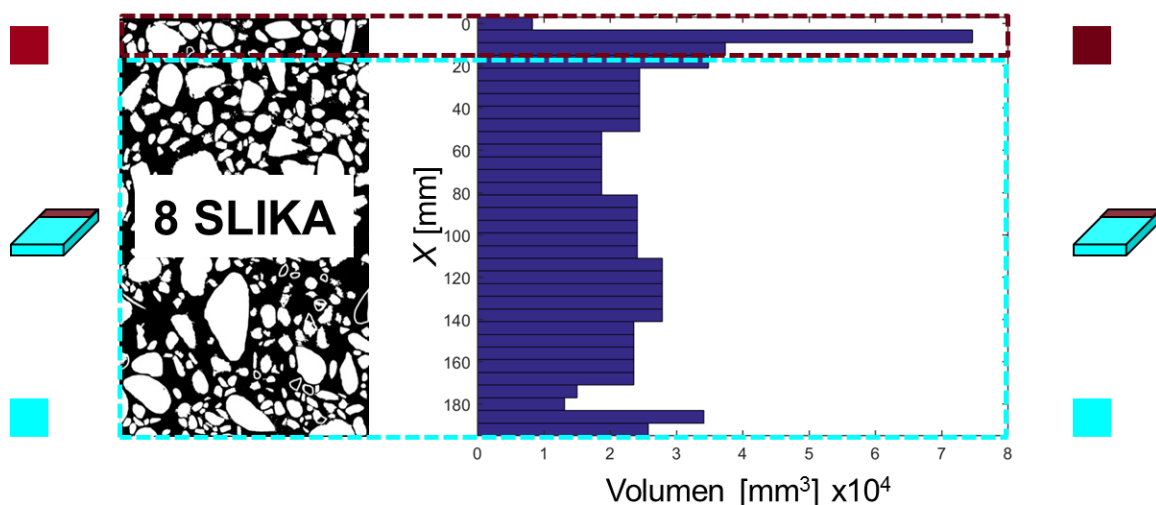
Na isti način opisan u prethodnom poglavlju, svakom intervalu udaljenosti od oplata može se izračunati volumen agregata i time dobiti informacija o distribuciji agregata u vertikalnoj ravnini (Slika 6.3). I ovdje je moguće podijeliti beton u regije:

1. Dio do oplata betonskog bloka
2. Unutrašnjost betonskog bloka.

Horizontalna distribucija agregata u betonskom bloku ukazuje da postoji značajna razlika između unutarnjeg dijela betonskog bloka i oplata. Naime, slično kao i kod donjeg dijela betona u vertikalnoj distribuciji i ovdje se, na udaljenosti od oplata jednakoj udaljenosti od dna betona (razlog je geometrijski te pojašnjen u prethodnom poglavlju), javlja maksimalni volumen agregata ($7.45 \times 10^4 \text{ mm}^3$). Hipoteza je da se u blizini oplata veliki broj kamenčića javlja zbog vibracija u procesu proizvodnje betonskog bloka. Naime, prilikom vibriranja, smjesa cementa, vode i agregata pomiče se prema oplati betonskog bloka. Dolaskom u doticaj s oplatom agregati ne mogu nastaviti dalje dok mješavina vode i cementa, zbog svog fluidnog stanja, nastavlja teći u smjeru vrtloga koji se javljaju u blizini oplata. Naravno, ovo je ekstremni slučaj te vrtlozi utječu i na agregate međutim, ne u tolikoj mjeri kao na smjesu cementa i vode. Ova hipoteza nije provjerena niti dokazana te su potrebna dodatna istraživanja za proučavanje navedene pojave. Drugu hipotezu opisali su Zheng i sur. (Zheng et al., 2003) koji su matematičkim modelom dobili utjecaj oplata na distribuciju agregata. Na slici 6.3 vrijednosti volumena agregata predstavljaju srednje vrijednosti 5 intervala udaljenosti kako bi se smanjio šum. Prva 4 i zadnja 4 intervala su, zbog utjecaja na distribuciju, promatrani zasebno te za njih nije računata srednja vrijednost već točne vrijednosti.

Kako se proces direktne montaže u dio do oplata betona, pri obliku betonskog bloka kao na slici 5.1 rijetko događa u stvarnosti, neće se dodatno uspoređivati dio do oplata sa unutrašnjim betonom. Iz istog razloga, pri modeliranju virtualnog betonskog bloka, distribucija u horizontalnom smjeru se neće posebno modelirati, već će se samo bazirati na slučajnoj distribuciji i geometrijskom utjecaju oplata opisan u radu Zhenga i sur. (2003).

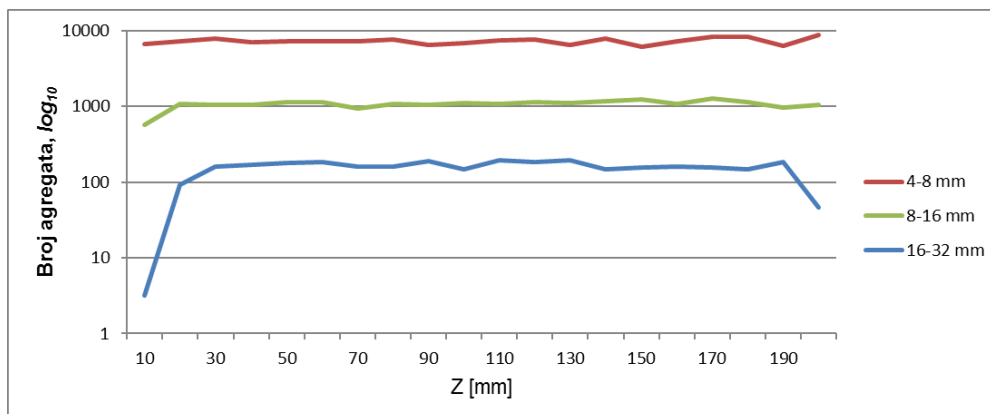
1. Dio do oplate
2. Unutrašnji beton



Slika 6.3 Distribucija agregata u horizontalnoj ravnini

6.3. Distribucija za virtualni betonski blok

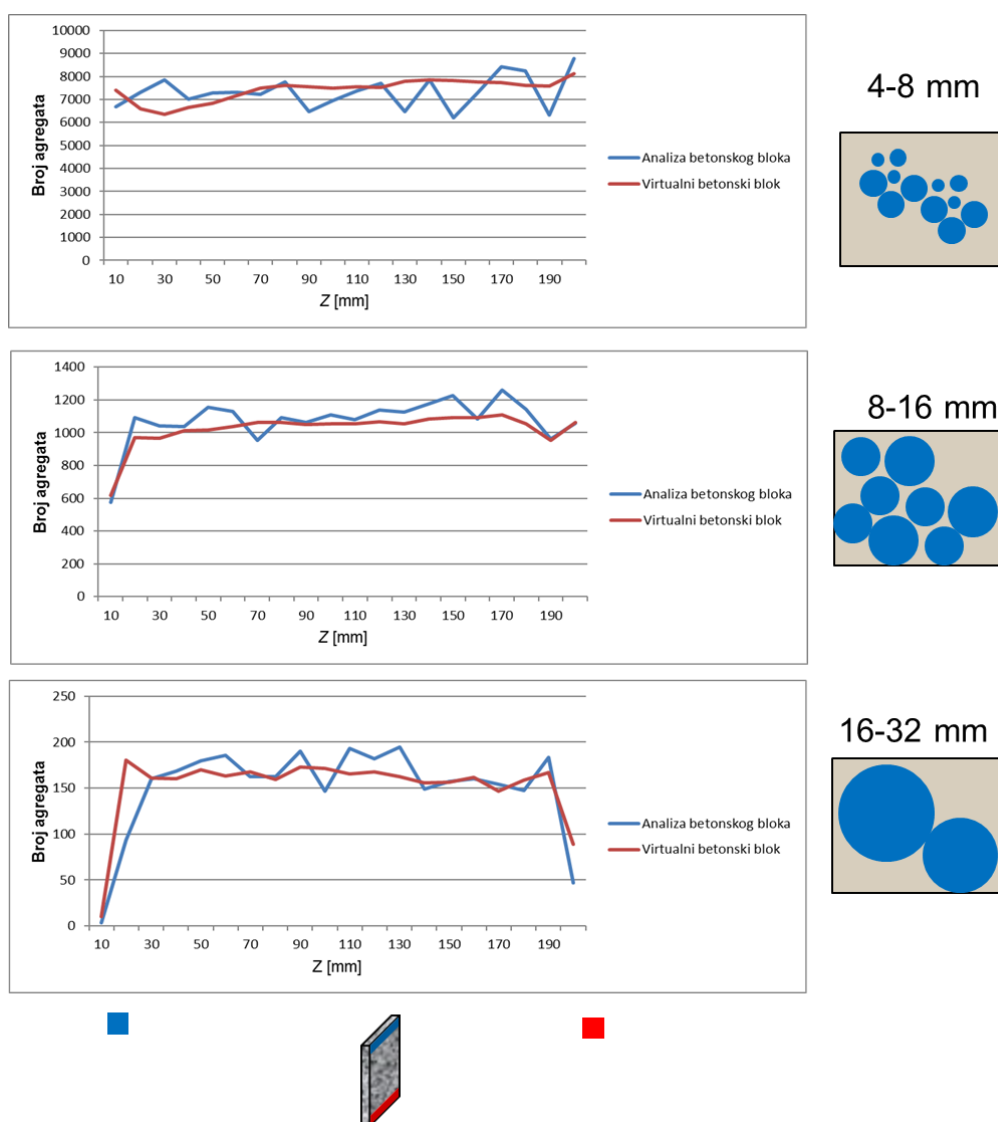
Slika 6.4 prikazuje broj agregata u ovisnosti o dubini betonskog bloka na temelju koje se modelira virtualni betonski blok. Iz distribucije je vidljivo da broj malih (4-8 mm) i srednjih (8-16 mm) agregata raste sa porastom dubine (od 6800 do 8000 agregata po intervalu dubine kod malih te od 950 do 1100 agregata po intervalu dubine kod srednjih agregata). Broj velikih agregata (16-32 mm) u donjem dijelu i unutrašnjem betonu je približno konstantan (~170 agregata po intervalu dubine) dok je u gornjem dijelu njihov broj smanjen (u prva tri intervala dubine broj agregata raste od 0 do 150).



Slika 6.4 Distribucija agregata u vertikalnoj ravnini – broj agregata

6.4. Virtualni betonski blok

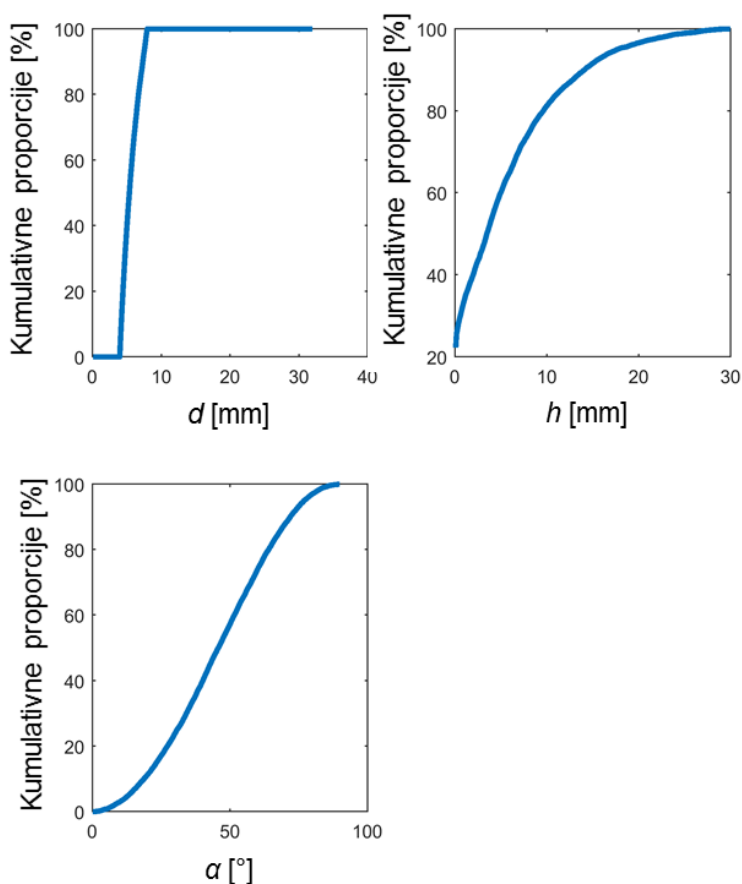
Virtualni betonski blok izrađen pomoću DEM metode baziran je na broju agregata na određenom intervalu dubine. Njegova distribucija (plavo) zajedno s analiziranom distribucijom (crveno) prikazana je na slici 6.5. Naime, iako se distribucija ne poklapa, bitni efekti kao povećani broj agregata u donjem dijelu betonskog bloka su izraženi te se pretpostavlja da je virtualni model betonskog bloka zadovoljavajući za daljnje istraživanje. Za daljnju analizu potrebno je definirati dio betona u koji će se vršiti proces direktne montaže. Kako je broj velikih agregata (16-32 mm) koji više utječu na proces direktne montaže veći u donjem dijelu betonskog bloka, proces zabijanja čavla i distribucija parametara interakcije pratit će se za donji dio betonskog bloka.



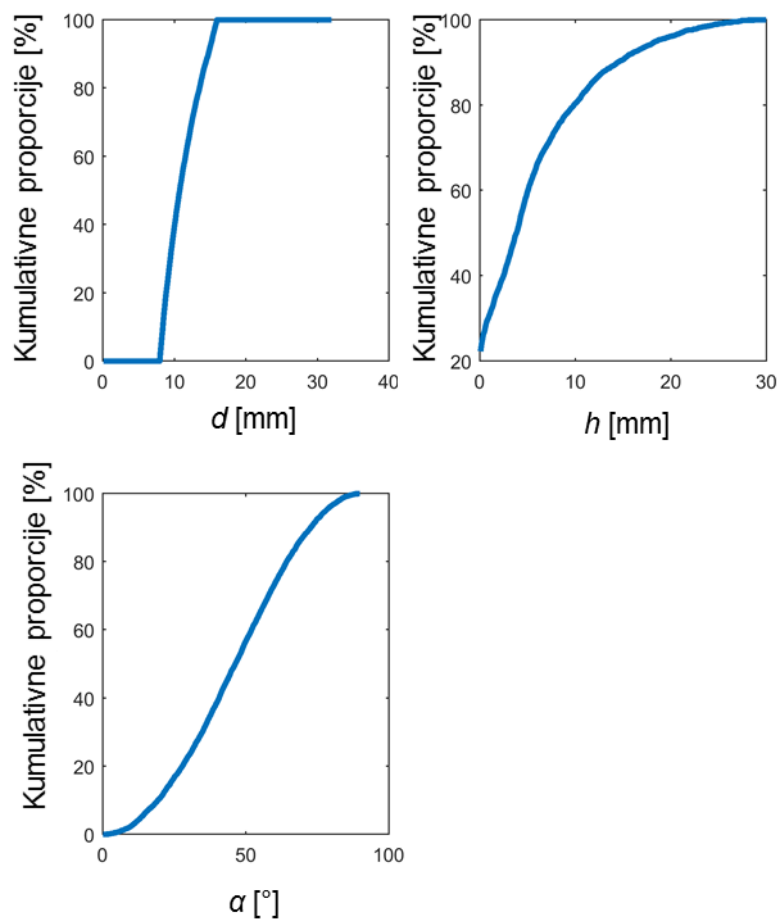
Slika 6.5 Usporedba distribucija provedene analize i DEM virtualnog betona

6.5. Monte Carlo simulacija procesa direktne montaže

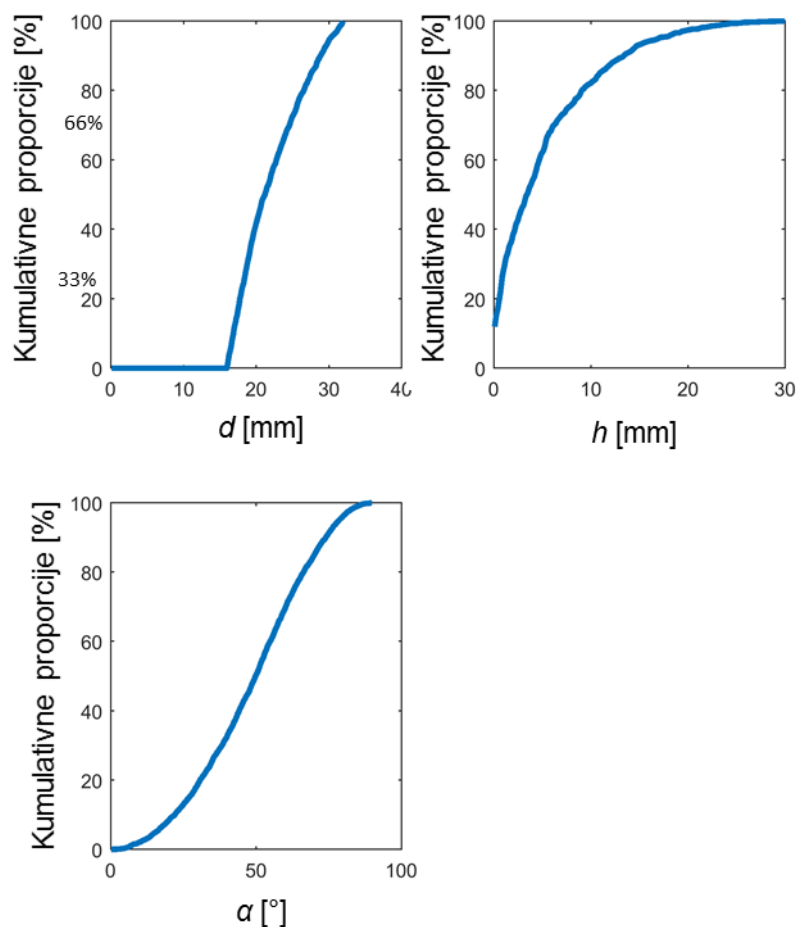
Dobivanje distribucije parametara interakcije na donjem dijelu betonskog virtualnog bloka izvršeno je Monte Carlo metodom. Simuliralo se 20 000 slučajeva zabijanja čavla procesom direktne montaže kojim se u 50.5% slučajeva pogodio agregat najmanje klase agregata (4-8 mm), u 30.15% slučajeva agregat srednje klase agregata (8-16 mm) dok je u 19.35% slučajeva pogođena najveća klasa agregata (16-32 mm). Distribucija svake klase agregata prikazana je odvojeno kako bi se budućim simulacijama dobio utjecaj svake klase agregata pojedinačno (Slike 6.6, 6.7 i 6.8). Iz slika je vidljivo da veliki broj čavala (oko 23% kod najmanje i srednje klase agregata te oko 15% kod najveće klase agregata) pogodi agregat koji je na površini betonskog bloka. Također, primjetno je da kut interakcije svih klasa agregata ima približno normalnu distribuciju što znači da je manje vjerojatno da će čavao udariti agregat pod kutem blizu rubnih vrijednosti (0° i 90°) nego pod kutem oko središnje vrijednosti (45°).



Slika 6.6 Distribucija parametara interakcije sa 20000 procesa direktne montaže – AC 4-8 mm



Slika 6.7 Distribucija parametara interakcije sa 20000 procesa direktne montaže – AC 8-16 mm



**Slika 6.8 Distribucija parametara interakcije sa 20000 procesa direktne montaže – AC
16-32 mm**

6.6. Reprezentativne vrijednosti parametara interakcije

Odabrane reprezentativne vrijednosti svakog parametra svake klase agregata prikazane su u tablici 6.1. Iz rezultata je vidljivo da su odabrani kutevi kod svih klasa agregata približno isti što upućuje na to da ne postoji korelacija između kuta interakcije i klase agregata. Nadalje, vidljivo je kako su sve odabrane vrijednosti dubine agregata h uglavnom u prvoj trećini (0-10 mm) od maksimalne dubine zabijanja čavla (30 mm, (Hilti, 2015)) što inicira da navedena metoda optimalno određuje parametre ovisno o njihovoj stvarnoj distribuciji.

Tablica 6.1 Reprezentativne vrijednosti parametara interakcije

Redni broj kvantile (Kumulativni postotak)	AC_j								
	4-8			8-16			16-32		
	d [mm]	h [mm]	α [°]	d [mm]	h [mm]	α [°]	d [mm]	h [mm]	α [°]
1 (16.67%)	4.4	0	24.3	8.9	0	25.2	17.6	0.3	27.7
3 (50%)	5.4	3.6	45.5	10.9	3.6	46.3	21.4	3.3	48
5 (83.33%)	7	10.7	66.7	13.9	10.6	66.8	27.2	9.4	68.5

6.7. Definirane vrijednosti parametara za SFEM simulacije

27 definiranih simulacija (9 simulacija za svaku klasu agregata) odabranih kombiniranjem reprezentativnih vrijednosti metodom opisanom u poglavlju 5.9 prikazani su u tablici 6.2. Vidljivo je da klase agregata imaju različiti postotak pojavljivanja (50,49% za klasu agregata 4-8 mm, 30,15% za klasu agregata 8-16 mm te 19,35% za klasu agregata 16-32 mm) koji je pri vrednovanju čavla na temelju rezultata numeričke simulacije potrebno uzeti u obzir.

Tablica 6.2 Definirani parametri interakcija kao ulazne varijable u SFEM analizu

Broj simulacije	d	h	α	Postotak pojavljivanja u procesu direktne montaže
1	4.4	0.1	24.3	50.49%
2	4.4	3.6	66.7	
3	4.4	10.7	45.5	
4	5.4	0.1	45.5	
5	5.4	3.6	24.3	
6	5.4	10.7	66.7	
7	7	0.1	66.7	
8	7	3.6	45.5	
9	7	10.7	24.3	
10	8.9	0.1	25.2	30.15 %
11	8.9	3.6	66.8	
12	8.9	10.6	46.3	
13	10.9	0.1	46.3	
14	10.9	3.6	25.2	
15	10.9	10.6	66.8	
16	13.9	0.1	66.8	
17	13.9	3.6	46.3	
18	13.9	10.6	25.2	
19	17.6	0.3	27.7	19.35%
20	17.6	3.3	68.5	
21	17.6	9.4	48	
22	21.4	0.3	48	
23	21.4	3.3	27.7	
24	21.4	9.4	68.5	
25	27.2	0.3	68.5	
26	27.2	3.3	48	
27	27.2	9.4	27.7	

7. Diskusija

Kritički osvrt na dobivene rezultate, kao i usporedba predložene metodologije sa pregledom literature bit će dana u ovom poglavlju.

7.1. Analiza distribucije agregata

Provedenim eksperimentalnim istraživanjem potvrđena je metodologija za analizu betonskog (poglavlje 4.1-4.4), te su se identificirale prednosti koje omogućuju implementaciju metodologije u industrijskom okruženju:

- Jednostavnost – analizu može provoditi osoba koja nije specijalizirana za računalnu tomografiju ili numeričku analizu (DEM)
- Niska cijena – korištenje samo osnovnih uređaja (standardni skener te rezač betona) osigurava nižu cijenu analize od računalne tomografije
- Računalna nezahitjnost – relativno jednostavne matematičke operacije omogućuju analizu betonskog bloka većih dimenzija nego što je to slučaj sa DEM metodom (Hentz et al., 2004).

Uspoređivanjem s prethodnim istraživanjima, moguće je primjetiti nekoliko unaprjeđenja u odnosu na prethodne metode i pristupe vezano uz dobivene distribucije agregata, modeliranje betonskog bloka te obradu slike. Naime, niti jedna od prethodnih analiza distribucije agregata nema eksplicitne podatke o distribuciji agregata u betonskom bloku, odnosno podatke nije moguće jednostavno implementirati za modeliranje betonskog bloka (Han et al., 2016; Mechtcherine et al., 2013; Safawi et al., 2004; Wong & Chau, 2005). Nadalje, niti jedan od prethodno razvijenih modela virtualnog betonskog bloka (Hentz et al., 2004; Kim & Abu Al-Rub, 2011; Qian et al., 2016; Zheng et al., 2003) ne podržava modeliranje distribuciju agregata baziranoj na rezultatima analize (Han et al., 2016; Mechtcherine et al., 2013; Safawi et al., 2004; Wong & Chau, 2005). Oba nedostatka prijašnjih analiza riješeni su implementacijom novog načina određivanja distribucije agregata u betonskom bloku koja kao izlaz ima, za svaki dubinski interval betonskog bloka, broj agregata različitih veličina.

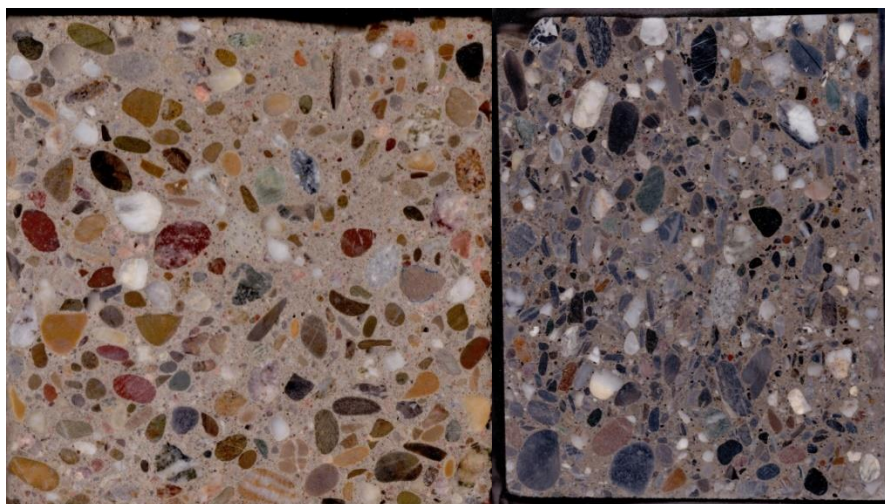
Obrada slike presjeka betonskog bloka analizira RGB sliku čime se trostruko povećava vrijeme obrade slike u odnosu na analizu monokromatske slike (sa 20 s na 60 s) u prethodno navedenim pristupima (Fang & Labi, 2007; Feng et al., 2016; Han et al., 2016; Önal et al., 2008; Ozen & Guler, 2014), ali se stoga smanjuje vrijeme potrebno za ručnu korekciju zbog većeg broja prepoznatih agregata. Preloženi algoritam je nije osjetljiv na slike različitih kontrasta. Naime,

zbog povećanog opsega obrade slike moguće je blagom perturbacijom ulaznih parametara analizirati potpuno različite slike (sa gledišta obrade slike - Slika 7.1).

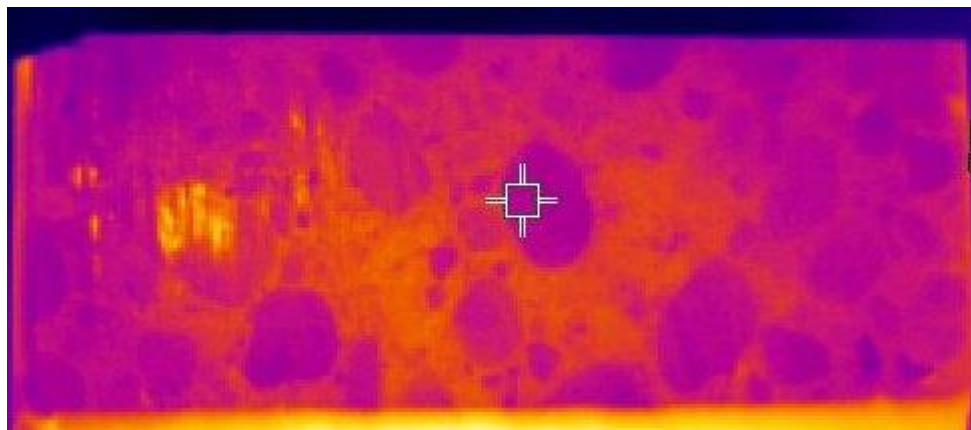
Dodatno smanjenje vremena ručne korekcije obrađenih slika moguće je povećanjem kontrasta između agregata i matrice. Osim prijedloga danih u literaturi (Breul et al., 2008; Joshi, 2014; Ozen & Guler, 2014), kontrast je moguće dodatno poboljšati:

- Snimanjem termalne slike betonskog bloka izloženog zračenju (razlika u toplinskom kapacitetu agregata i matrice) (Slika 7.2)
- Bojanjem matrice prije procesa lijevanja
- Bojanjem presjeka betonskog bloka s bojom na bazi vode – matrica je porozna, dok je većina materijala agregata vodonepropusna.

Niti jedan od prijedloga nije detaljno proučen i stoga su mogući predmeti proučavanja budućih istraživanja.



Slika 7.1 Presjeci betonskog bloka različitih proizvođača



Slika 7.2 Termalna slika presjeka betonskog bloka izloženog zračenju

Uvođenjem vjerojatnosti za predviđanje stvarne veličine agregata izbjegao se problem 2D podataka (Slika 4.7) što do sada nije uvedeno niti u jednom istraživanju pri obradi 2D slike (Breul et al., 2008; Fang & Labi, 2007; Feng et al., 2016; Han et al., 2016; Joshi, 2014; Önal et al., 2008; Ozen & Guler, 2014). Pritom je važno naglasiti da se izvodljivost ograničila na relativno jednostavan matematički oblik – sferu. Za potpunu validaciju predložene metode sa sferama potrebna je usporedba rezultata distribucije agregata unutar betonskog bloka s rezultatima dobivenima 3D računalnom tomografijom ili sličnom metodom koja sadrži treću dimenziju agregata.

Računanje vjerojatnosti za drugačiji matematički oblik (npr. elipsoid) postaje previše kompleksno. Međutim, poznavanjem distribucije sfernih agregata (trenutna statistička analiza), moguće je implementirati dvoosne elipsoide u virtualni betonski blok. Pri modeliranju virtualnog bloka, promjer u sfernom pristupu analizi bi bila jedna os elipsoida (dodatno istraživanje je potrebno kako bi se odredilo koja os – mala ili velika). Dodatnom analizom agregata koji se koriste u izradi betonskog bloka moguće je dobiti distribuciju oblika agregata (omjer male i velike poluosi) te bi se njenom implementacijom mogao dobiti konačan oblik agregata. Nadalje, analizom 2D slika, moguće je dobiti distribuciju orijentacije agregata opisanih elipsama. Distribucija orijentacije u horizontalnoj i vertikalnoj ravnini bi se koristila, zajedno sa distribucijom pozicije sfernih agregata, pri pozicioniranju dvoosnog elipsoida u virtualni betonski blok. Navedeni pristup sa elipsoidima nije implementiran, ali zasigurno predstavlja jedno od mogućih područja daljnjeg istraživanja.

7.2. Stohastička analiza virtualnog betonskog bloka

Monte Carlo simulacijom eksperimenta direktne montaže omogućeno je računalno nezahjevno zabijanje velikog broja čavala te određivanje parametara interakcije agregata i čavla. Zabijanjem velikog broja čavala distribucija parametara konvergira čime se izbjegao utjecaj na distribuciju parametre interakcije zbog malog broja uzorka. Pri pregledu literature o primjeni Monte Carlo metode nisu pronađena slična razmatranja. Izvodljivosti algoritma značajno pridonosi oblik agregata, koji je u ovom radu opisan sferama. Međutim, modelira li se betonski blok s matematički složenijim oblikom – elipsoidom na način opisan u prošlom poglavlju, parametre interakcije potrebno je redefinirati jer interakciju čavla i elipsoida nije moguće jednoznačno opisati sa parametrima definiranim u ovome radu. Također je potrebno razviti algoritam koji će nakon Monte Carlo procesa direktne montaže računati redefinirane parametre interakcije čavla i agregata. Pri razvoju algoritma, od velike pomoći bi mogao biti rad Petera

Paula Kleina gdje je pokazan način određivanja jednadžbe elipse nastala presjekom ravnine i elipsoida (Klein, 2012).

7.3. Odabir reprezentativnih vrijednosti

Metodom za određivanje reprezentativnih vrijednosti definiraju se ulazni parametri numeričke simulacije diskretiziranjem prethodno određene distribucije. Istraživači su prethodno koristili slučajan izbor ulaznih parametara (G. Stefanou & Papadrakakis, 2004) ili linearnu diskretizaciju distribucije ulaznih parametara (Al-momani & Rawabdeh, 2008; Lin, 2011; Zahn, 1998). Time se izbjegao preveliki broj simulacija slučajeva koji se relativno rijetko događaju. Tako definirane parametre moguće je koristiti u determinističkoj FEM metodi, koja se koristi i kod Monte Carlo SFEM metode (Arregui-Mena et al., 2014).

Mogući problem javlja se kod višedimenzionalnih stohastičkih polja gdje je potrebno metodama planiranja eksperimenta efikasno odrediti kombinacije ulaznih parametara kako bi se smanjio broj kombinacija pri simulacijama.

7.4. Implikacije za istraživanje i industrijsku primjenu

Provedeno istraživanje doprinosi u raznim znanstvenim i industrijskim područjima. Rezultati analize distribucije agregata te predložena metodologija analize betona doprinose znanstvenoj grani koja se bavi proučavanjem materijala te industrijama koje proizvode beton i/ili proizvode koji su u interakciji sa betonom. Standardizirane simulacije industriji omogućuju jednostavnu usporedbu varijacija čavala dok proces određivanja reprezentativnih parametara daje istraživačima mogući pristup za određivanje vrijednosti stohastičkih parametara tijekom razvoja proizvoda.

8. Zaključak

Ovim radom predložena je metodologija za implementiranje stohastičkih parametara u numeričke simulacije procesa direktne montaže. Ona obuhvaća analizu stvarnog betonskog bloka, modeliranje virtualnog betonskog bloka, Monte Carlo simulaciju procesa direktne montaže i odabir reprezentativnih vrijednosti iz distribucije parametara. Izlazne vrijednosti istraživanja (Tablica 6.2) koristit će se za kao ulazne varijable kod determinističkih MKE metoda. Rezultati simulacija služit će kao podloga za dobivanje parametara kojima će se vrednovati alternative proizvoda – čavla.

Analiza betonskog bloka temelji se na 2D obradi slike presjeka betonskog bloka i statističkoj analizi pozicije i veličine agregata opisanih sferama. Razvijeni algoritam za obradu slike prepoznaje većinu agregata te je robustan na različite tipove betonskog bloka. Kako bi se izbjegle naknadne ručne korekcije slika, potrebno je povećati kontrast između agregata i matrice ili promijeniti način snimanja slike (termalna slika betonskog bloka izloženog zračenju).

Statističkom analizom određena je distribucija agregata, a samim time i njihova segregacija u betonskom bloku. Zaključeno je da predložen proces analize betonskog bloka predstavlja jednostavniji i povoljniji (cjenovno odnosno računalno, ovisno o usporednom procesu) način analize. Međutim, prije uporabe predložene metode u industrijske svrhe, potrebna je validacija statističke analize distribucije agregata u kojoj se 2D podaci transformiraju u 3D podatke ovisno o vjerojatnostima. Validacija je moguća 3D računalnom tomografijom ili sličnom metodom koja kao rezultat daje točnu distribuciju agregata. Rezultatima analize betonskog bloka zaključilo se da segregacija više utječe na veće agregate (16-32 mm) te da donji dio betonskog bloka sadrži više agregata od gornjeg dijela.

Monte Carlo simulacijom eksperimenta direktne montaže omogućeno je računalno zabijanje velikog broja čavala te određivanje parametara interakcije agregata i čavla. Upotrebom Monte Carlo simulacije na donjoj strani virtualnog betonskog bloka zaključilo se da otprilike 20% čavala kolidira s agregatom odmah na površini betonskog bloka te da parametar kuta ima približno normalnu distribuciju za sve klase agregata.

Odabirom reprezentativnih vrijednosti iz prethodno određene distribucije mogu se definirati parametri koji jednako pokrivaju cijelu distribuciju (izbjegao se preveliki broj simulacija slučajeva koji se rijetko događaju). Eksperimentom je uočeno da višedimenzionalno stohastičko polje uvelike povećava broj odabranih slučajeva iz čega se da zaključiti da je pri

višedimenzionalnim stohastičkim poljima potrebno je koristiti metode planiranja eksperimenta (DoE engl. – Design of Experiment) kako bi se smanjio broj izlaznih simulacija. Iz rezultata odabira vrijednosti može se zaključiti da ne postoji korelacija između kuta interakcije i klase agregata.

Kombiniranje reprezentativnih vrijednosti rezultiralo je sa 27 definiranih simulacija koje je potrebno analizirati determinističkom MKE metodom. Prilikom vrednovanja rezultata numeričke simulacije čavla, potrebno je uzeti u obzir učestalost pojavljivanja pojedinih klasa agregata u betonu (50,49% za klasu agregata 4-8 mm, 30,15% za klasu agregata 8-16 mm te 19,35% za klasu agregata 16-32 mm).

Proces analize distribucije agregata te numerički eksperiment direktne montaže moguće je dodatno poboljšati ukoliko bi se agregati opisali kao dvoosni elipsoidi. Implementacijom dvoosnih elipsoida dodatno bi se poboljšao matematički model betona te preciznije odredili ulazni parametri numeričkih simulacija.

Navedenim zaključcima i diskusijom, otvaraju se novi smjerovi budućeg istraživanja kojima se može poboljšati metodologija za implementiranje stohastičkih parametara u razvoju čavla i procesu direktne montaže:

- Provesti validaciju statističke analize betonskog bloka
- Poboljšati proces obrade slike betonskog bloka nekim od predloženih načina povećanja kontrasta između agregata i matrice ili promijeniti način snimanja slike
- Implementirati dvoosne elipsoide ili drugi matematički oblik u proces statističke analize betonskog bloka, virtualni betonski blok te Monte Carlo simulaciju procesa direktne montaže.
- Pri višedimenzijalnim stohastičkim poljima, implementirati metodu određivanja reprezentativnih parametara iz distribucije koja uzima u obzir korelaciju parametara
- Pri analizi višedimenzijalnih polja, implementirati planiranje pokusa koje će na jednostavan način omogućiti određivanje izlaznih parametara simulacije potrebnih pri vrednovanju alternativa proizvoda
- Razvoj simulacije procesa direktne montaže u koju će se na jednostavan način moći implementirati slučajevi dobiveni ovim istraživanjem
- Dobivanje parametara iz simulacija kojima će se vrednovati alternativa proizvoda – čavla.

ZAHVALE

Zahvaljujem mentoru dr. sc. Stanku Škecu na pruženoj prilici, strpljenju, savjetima, motivaciji i pomoći tijekom izrade ovog rada.

Zahvaljujem se Furkanu Gültekinu, mag. ing. (Hilti) na pomoći tijekom razvoja metodologije.

Zahvaljujem svima ostalima koji su na bilo koji način pomogli tijekom izrade ovog rada.

LITERATURA

- Ajamu, S. O., & Ige, J. A. (2015). Effect of Coarse Aggregate Size on the Compressive Strength and the Flexural Strength of Concrete Beam. *International Journal of Engineering Research and Applications*, 5(1(Part 4)), 67–75. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.10.009>
- Al-momani, E., & Rawabdeh, I. (2008). An Application of Finite Element Method and Design of Experiments in the Optimization of Sheet Metal Blanking Process. *Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering*, 2(1), 53–63.
- Arregui-Mena, J. D., Margetts, L., & Mummery, P. M. (2014). Practical Application of the Stochastic Finite Element Method. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 23(1), 171–190. <https://doi.org/10.1007/s11831-014-9139-3>
- ASTM Committee C09.91. (2015). ASTM C125-15a Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates. In *Annual Book of ASTM Standards Volume 04.02* (pp. 1–8). <https://doi.org/10.1520/C0125-15A>
- Blessing, L., & Chakrabarti, A. (2009). DRM: A Design Research Methodology. *Springer London*, (September), 13–42. <https://doi.org/10.1007/978-1-84882-587-1>
- Breul, P., Geoffray, J.-M., & Haddani, Y. (2008). On-Site Concrete Segregation Estimation Using Image Analysis. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 6(1), 171–180. <https://doi.org/10.3151/jact.6.171>
- Du, X. (n.d.). Monte Carlo Simulation. Retrieved January 1, 2017, from http://web.mst.edu/~dux/repository/me360/me360_lecture8.html
- Fang, C., & Labi, S. (2007). Image-Processing Technology to Evaluate Static Segregation Resistance of Hardened Self-Consolidating Concrete. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (2020), pp 1-9. <https://doi.org/10.3141/2020-01>
- Feng, B., Xu, Z., Xia, J., Jin, S., & Jin, W. (2016). Edge Detection of Concrete Mesostructure Based on DIS Operator. *5th International Conference on Durability of Concrete Structures Jun 30-Jul 1, 1*.
- Ghanem, R. G., & Spanos, P. D. (2003). *Stochastic finite elements: a spectral approach*. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(1999\)125:1\(26\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(1999)125:1(26))
- “GünniX,” S. W. (2017). No Title. Retrieved January 1, 2017, from https://en.wikipedia.org/wiki/Stokes'_law

- Han, J., Wang, K., Wang, X., & Monteiro, P. J. M. (2016). 2D image analysis method for evaluating coarse aggregate characteristic and distribution in concrete. *Construction and Building Materials*, 127, 30–42. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.120>
- Hentz, S., Daudeville, L., & Donzé, F. V. (2004). Identification and Validation of a Discrete Element Model for Concrete. *Journal of Engineering Mechanics*, 130(6), 709–719. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(2004\)130:6\(709\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(2004)130:6(709))
- Hilti. (2015). *Direct Fastening Technical Guide.pdf* (15th ed.). Tulsa: Hilti. Retrieved from <https://submittals.us.hilti.com/PTGVol1/files/assets/common/downloads/publication.pdf>
- Hilti. (2017). HOW TO select the right nail for concrete - a Hilti quick guide to direct fastening. Retrieved from <https://www.youtube.com/watch?v=4YMkD3nCSJU>
- Joshi, S. K. (2014). On Application of Image Processing: Study of Digital Image Processing Techniques for Concrete Mixture Images and Its Composition. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT) ISSN: 2278-0181 Vol. 3 Issue 3, March - 2014*, 3(3), 1137–1146.
- Kim, S. M., & Abu Al-Rub, R. K. (2011). Meso-scale computational modeling of the plastic-damage response of cementitious composites. *Cement and Concrete Research*, 41(3), 339–358. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.12.002>
- Klein, P. P. (2012). On the Ellipsoid and Plane Intersection Equation. *Applied Mathematics*, 3(November), 1634–1640. <https://doi.org/10.4236/am.2012.311226>
- Kostić, S., Vasović, N., & Marinković, B. (2017). Robust optimization of concrete strength estimation using response surface methodology and Monte Carlo simulation. *Engineering Optimization*, 49(5), 864–877. <https://doi.org/10.1080/0305215X.2016.1211432>
- Kozul, R., & Darwin, D. (1997). Effects of Aggregate Type, Size and Content on Concrete Strength and Fracture Energy, (43), 85.
- Lin, C.-W. (2011). An application of Taguchi method on the high-speed motorized spindle system design. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 225(9), 2198–2205. <https://doi.org/10.1177/0954406211405279>
- Mechtcherine, V., Gram, A., Krenzer, K., Schwabe, J.-H. J.-H., Shyshko, S., & Roussel, N. (2013). Simulation of fresh concrete flow using Discrete Element Method (DEM): theory and applications. *Materials and Structures*, 47(4), 615–630. <https://doi.org/10.1617/s11527-013-0084-7>
- Mechtcherine, V., & Shyshko, S. (2015). Simulating the behaviour of fresh concrete with the

- Distinct Element Method – Deriving model parameters related to the yield stress. *Cement and Concrete Composites*, 55, 81–90. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.08.004>
- Meddah, M. S., Zitouni, S., & Belâabes, S. (2010). Effect of content and particle size distribution of coarse aggregate on the compressive strength of concrete. *Construction and Building Materials*, 24(4), 505–512. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.10.009>
- Önal, O., Özden, G., & Felekoğlu, B. (2008). A methodology for spatial distribution of grain and voids in self compacting concrete using digital image processing methods. *Computers and Concrete*, 5(1), 61–74. <https://doi.org/10.12989/cac.2008.5.1.061>
- Ozen, M., & Guler, M. (2014). Assessment of optimum threshold and particle shape parameter for the image analysis of aggregate size distribution of concrete sections. *Optics and Lasers in Engineering*, 53, 122–132. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2013.08.020>
- Pedersen, R. R., Simone, A., & Sluys, L. J. (2013). Mesoscopic modeling and simulation of the dynamic tensile behavior of concrete. *Cement and Concrete Research*, 50, 74–87. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.03.021>
- Popescu, R., Deodatis, G., & Nobahar, A. (2005). Effects of random heterogeneity of soil properties on bearing capacity. *Probabilistic Engineering Mechanics*. <https://doi.org/10.1016/j.probengmech.2005.06.003>
- Qian, Z., Garboczi, E. J., Ye, G., & Schlangen, E. (2016). Anm: a geometrical model for the composite structure of mortar and concrete using real-shape particles. *Materials and Structures*, 49(1–2), 149–158. <https://doi.org/10.1617/s11527-014-0482-5>
- Safawi, M. I., Iwaki, I., & Miura, T. (2004). The segregation tendency in the vibration of high fluidity concrete. *Cement and Concrete Research*, 34(2), 219–226. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(03\)00249-7](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00249-7)
- Singer, S. (2012). *Matematika IX - Predavanja*. Zagreb.
- Stefanou, G. (2009). The stochastic finite element method: Past, present and future. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 198(9), 1031–1051. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2008.11.007>
- Stefanou, G., & Papadrakakis, M. (2004). Stochastic finite element analysis of shells with combined random material and geometric properties. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 193(1–2), 139–160. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2003.10.001>
- Štorga, M. (2017). *Teorija konstruiranja. Početno oblikovanje komponenti proizvoda*. Zagreb.
- Vilane, B. R. T., & Sabelo, N. (2016). The Effect of Aggregate Size on the Compressive

Strength of Concrete, 2(6), 66–69.

- Wong, R. C. K., & Chau, K. T. (2005). Estimation of air void and aggregate spatial distributions in concrete under uniaxial compression using computer tomography scanning. *Cement and Concrete Research*, 35(8), 1566–1576. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.08.016>
- Zahn, B. A. (1998). Using design of experiment simulation responses to predict thermal performance limits of the heatsink small outline package (HSOP) considering both die bond and heatsink solder voiding. In *Fourteenth Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium (Cat. No.98CH36195)* (pp. 153–160). IEEE. <https://doi.org/10.1109/STHERM.1998.660401>
- Zheng, J. J., Li, C. Q., & Jones, M. R. (2003). Aggregate distribution in concrete with wall effect. *Magazine of Concrete Research*, 55(3), 257–265. <https://doi.org/10.1680/macr.55.3.257.37577>

SAŽETAK

Nikola Horvat

Određivanje ulaznih parametara SFEM simulacije pri razvoju proizvoda

Ključne riječi: Direktna montaža, stohastička analiza, analiza distribucije agregata, obrada slike betona

Za uspješnu provedbu faza oblikovanja i detaljiranja proizvoda, ključno je precizno definirati konstrukcijske parametre koji su često stohastičke prirode (vjetar, parametri uzrokovani heterogenošću materijala itd.). Stoga, kao glavni ishodi ovog istraživanja, predložena je metodologija određivanja stohastičkih parametara i njihovih reprezentativnih vrijednosti pri procesu direktne montaže čavla u heterogeni materijal – beton. Metodologija se sastoji od analize distribucije agregata u betonskom bloku, stohastičke analize virtualnog betonskog bloka te odabira reprezentativnih vrijednosti stohastičkih parametara na temelju njihove distribucije. Analiza distribucije agregata u betonskom bloku započinje rezanjem betonskog bloka na manje dijelove te skeniranjem presjeka dijelova betonskog bloka kako bi se dobili uzorci (slike presjeka) na kojima će se temeljiti distribucija. Slike presjeka binariziraju se predloženim algoritmom za obradu slike te se određuje pozicija i veličina svakog agregata sa uzorka. Zatim se uvođenjem vjerojatnosti pojavljivanja agregata na određenoj udaljenosti od ravnine rezanja, rezultati 2D analize slike transformiraju se u 3D rezultate koji su osnova za modeliranje virtualnog betonskog bloka. Na virtualnom betonskom bloku se Monte Carlo metodom procesa direktne montaže određuje distribucija stohastičkih parametara. Metodologija završava odabirom reprezentativnih vrijednosti iz distribucije stohastičkih parametara.

U eksperimentalnom dijelu rada, cijela metodologija je provedena u industrijskom okruženju kako bi se dokazala njena implementacija. Provedba je rezultirala analizom distribucije agregata kojom je vidljiva segregacija agregata. Omjer volumena agregata gornjeg i donjeg dijela betonskog bloka (30 mm) ovisan je o klasi agregata (0.94 za klasu agregata 4-8 mm, 0.86 za klasu agregata 8-16 mm i 0.68 za klasu agregata 16-32 mm). Monte Carlo analiza rezultirala je kolizijom čavla i najmanje klase agregata (4-8 mm) u 50.5% slučajeva, srednje klase agregata (8-16 mm) u 30.15% slučajeva i najveće klase agregata (16-32 mm) u 19.35% slučajeva. Ukupno je definirano 27 simulacija koje će služiti kao podloga za vrednovanje alternativa proizvoda (čavla).

SUMMARY

Nikola Horvat

Determination of SFEM simulation's input parameters in a product development

Keywords: Direct Fastening, stochastic analysis, analysis of aggregate distribution, image processing of concrete

To successfully conduct conceptual and embodiment phases of product development process, it is crucial to precisely define designing parameters which are often stochastic by nature (the wind, parameters caused by material heterogeneity, etc.). For that reason, as the main output of this research, methodology for determination of stochastic parameters and their representative values in the direct fastening of a nail into the heterogeneous material (concrete) was proposed. The proposed methodology consists of: analysis of aggregate distribution within a concrete block, stochastic analysis of virtual concrete and choosing representative values of the stochastic parameters (depending on their distribution). The aggregate distribution analysis starts with cutting a concrete block and scanning their sections. Scanned images are then binarized with the proposed image processing algorithms in order to obtain size and position of each aggregate. With this data, it is possible to introduce probabilities of aggregate position in the direction perpendicular to the cutting plane. With such approach, obtained 2D data was transferred into a 3D spatial distribution of aggregates which was then used for modelling of a virtual concrete block. Using the information from the virtual concrete block, Monte Carlo method has been used in order to determine a distribution of stochastic parameters. Finally, representative values were selected from the distribution of stochastic parameters and prepared as an input for further SFEM analysis. In the experimental part of this work, the complete methodology has been carried out in the industrial environment to prove its feasibility. The conducted experiment gave information about aggregate distribution with noticeable segregation of aggregates. Volume ratio of aggregates between top and bottom part of concrete (30 mm) was size dependent (0.94 for the aggregate size 4-8 mm, 0.86 for the aggregate size 8-16 mm and 0.68 for the aggregate size 16-32 mm). The Monte Carlo analysis resulted with nail hitting small aggregate (4-8 mm) in 50.5% of cases, middle sized aggregate (8-16 mm) in 30.15% of cases and big aggregate (16-32 mm) in 19.35% of cases. Finally, 27 simulation have been defined and they will be basis for the nail design evaluation.