

PRISTUP ZAŠTITI OD ZRAČENJA

MODELI I FANTOMI LJUDSKOG TELA

U DOZIMETRIJI I ZAŠTITI OD ZRAČENJA

10. 1. Istorijat razvoja fantoma u dozimetriji

Fantomi su fizičke ili virtuelne reprezentacije ljudskog tela koji se koriste za određivanje apsorbovane doze u organima i tkivima. Iako nije moguće napraviti takav fizički fantom ili matematički model fantoma koji bi precizno simulirao ljudsko telo, moguće je napraviti fantome ili modele koji se koriste kao aproksimativni surogati. Najjednostavniji fantomi su konstruisani od materijala ekvivalentnim tkivu sa šupljinama u organima da bi se postavili dozimetri za merenja (in situ). Takvi fantomi imaju gustinu koja odgovara plućima ili strukturi kostiju (ICRP51, 1987). Često se koriste vodeni fantomi, posebno u medicinskoj fizici, za određivanje raspodele doze u pacijentima izloženim zračenju. Za merenje raspodele apsorbovane doze za fotone i neutrone koriste se čvrsti homogeni fantomi. Sferni i pločasti fantomi su veoma jednostavna aproksimacija čovečijeg tela. Sferni model je dijametra 30 cm, sastoji se od materijala ekvivalentnog mekom tkivu i koristi se posebno u definisanju operativnih veličina u zaštiti od zračenja.

U zaštiti od zračenja jedan od prvih je fizički model Alderson-Rando fantom (Alderson et al., 1962). Ovakav fantom ima oblik ljudskog tela sa skeletom koji je umetnut u materijal ekvivalentan tkivu.

Fisher i Snyder (1967) su uveli matematički fantom, kod kojih se veličina i oblik tela i organa opisuju matematičkim jednačinama. Ovaj fantom je dalje razvijan (Snyder et al., 1978) u skladu sa preporukama u ICRP23 (ICRP,1975) i poznat je pod imenom MIRD5 (MIRD- Medical Internal Radiation Dose). U početku je bio namenjen za računanje apsorbovane doze od internog ozračivanja, a kasnije je modifikovan i primenjen za računanje apsorbovane doze od spoljašnjeg ozračivanja.

MIRD fantom se analitički definiše pomoću sekcija za pojedine delove tela: ruke, trup i kukovi se predstavljaju eliptičkim cilindrom, zarubljeni eliptički konusi predstavljaju noge, dok eliptički cilindar prikazuje glavu i vrat. Ruke nisu odvojene od trupa. Nema modela koji je adaptiran za najmanje organe (tj. nos, uši, stopala i prsti).

U MIRD fantomu su identifikovana tri tipa tkiva: skelet, pluća i meko tkivo. Koža je predstavljena slojem mekog tkiva debljine 2 mm i opkoljava celo telo. Za pluća i meko tkivo glavni elementi su: vodonik, ugljenik, azot i kiseonik, ali i drugi elementi prisutni u tragovima. Skelet sadrži značajan deo kalcijuma i fosfora. Pluća se neznatno razlikuju od mekog tkiva jer sadrže vazduh.

Originalni MIRD fantom je hermafroditni i uključuje gonade od oba pola i grudi za ženski pol i predstavljao je osnovu za razvoj budućih fantoma. Da bi se modeli koji se koriste za računanje raspodele apsorbovane doze približili realnim individuama, bilo je potrebno uvođenje muškog i ženskog modela, kao i određivanje modela za dete i novorođenče. Uveden je model za dečji fantom sa veličinom tela koja odgovara starosti od 0; 1; 5; 10 i 15 godina (Cristy, 1980). Modele odraslih fantoma oba pola (ADAM i EVA) razvio je Kramer (Kramer et al., 1982). Visina i masa tela i mase organa ovih MIRD tipova fantoma odgovaraju podacima za "standardnog" čoveka (ICRP, 1975).

Prvi pedijatrijski modeli razvijeni u ORNL laboratoriji (Oak Ridge National Laboratory) srazmernim umanjivanjem verzija modela odraslog fantoma. Kasnije modifikacije su poboljšane i uzimale su u obzir znanja o pedijatrijskoj anatomiji i rastu. Generacija dečjih modela (CHILD and BABY) dobijena je iz kompjuterske tomografske baze podataka (CT) (Zankl et al, 1988). Model deteta (CHILD) je baziran na CT podacima za 7-godišnje dete, a model novorođenčeta (BABY) za 8-nedeljnu bebu. Ovi modeli sastoje se iz velikog broja zapreminskih elemenata (voxel), 20 mm^{-3} i 30 mm^{-3} , respektivno. U najnovijim pedijatrijskim modelima organi su sasvim slični realnim.

Iako je znatno poboljšan proračun ekvivalentne doze, matematički MIRD tip fantoma je stilizovan model ljudskog tela i njegovih organa. Ovaj problem je razrešen razvojem tomografskih ili voksel fantoma. Voksel fantomi su zasnovani na digitalnim slikama dobijenim iz skeniranja stvarnih osoba metodom kompjuterske tomografije (CT) ili magnetne rezonance (MRI). Pri snimanju, svaka slika se sastoji iz matriksa, čiji broj zavisi od rezolucije izabrane u toku skeniranja. U poredjenju sa matematičkim fantomima, voksel fantomi su istinska reprezentacija ljudskog tela.

Tomografske ili voksel fantome je uveo Gibbs et al. (1984). Primenom Monte Carlo tehnika voksel fantomi se koriste za računanje apsorbovane doze u ljudskim organima u zaštiti od zračenja, radiografiji i dozimetriji (Zubal et al., 1994; Caon et al., 1999, 2000; Xu et al., 2000; Saito et al., 2001; Dimbylow, 2002; Kramer et al., 2003).

10.2. Pregled modela i fantoma

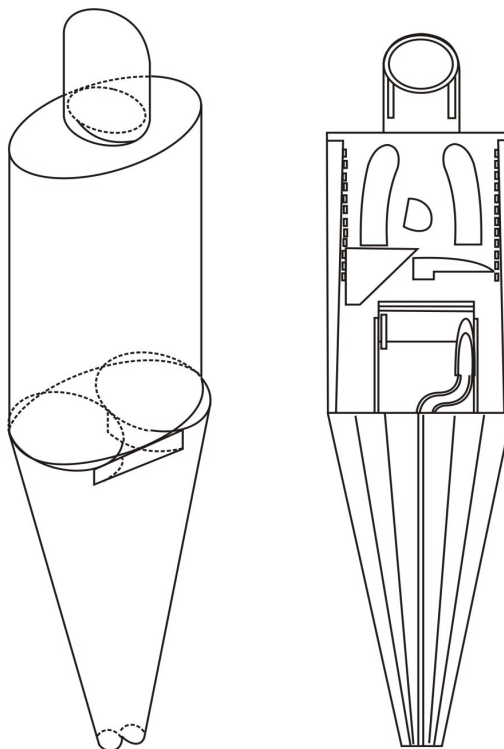
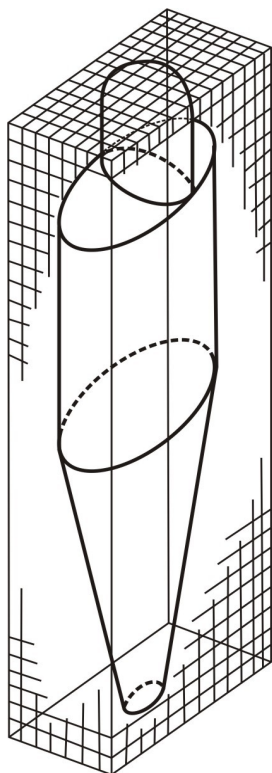
Preporuke za dizajn modela i fantoma ljudskog tela, koji se koriste u zaštiti od zračenja date su u Publikacijama ICRP23 (ICRP, 1975) i ICRP89 (ICRP, 2002) i ICRU Report 48 (ICRU, 1992). Ovi izveštaji obezbeđuju pregled anatomskih, fizioloških i metaboličkih karakteristika čoveka, i predlažu "tipične" ili referentne vrednosti za fantome. Svaki od modela uključuje opis modela, dijagram ili fotografiju, spoljašnje dimenzije, gistine razmatranih tkiva, primene i reference.

Digitalizovani matematički model (Digitized Mathematical Model) (Yamaguchi et al., 1985) predstavlja konverziju Snyder-ovog matematičkog modela (Snyder, 1969) u model koji se sastoji od zapreminskih elemenata kocki sa organima koji su označeni simbolima i prikazan je na sl. 2.1. Reprezentuje odraslu hermafroditnu jedinku. Visina i masa celog tela, kao i mase unutrašnjih organa zasnovane su na podacima iz (ICRP, 1975). Fizičke dimenzije su: visina 173 cm, trup i ruke (uzdužni diameter) 40 cm i trup (poprečni diameter) 20 cm. Ovaj model je osnova voksel modela dobijenim tehnikama CT ili MRI za računanja apsorbovane doze korišćenjem Monte Carlo metoda, posebno u radioterapiji.

GSF matematički modeli odraslog muškarca i žene-Adam i Eva (GSF Adult male and Female Mathematical Models -Adam and Eva –GSF-Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit, Germany) (Kramer et al., 1982) su matematički modeli za odraslog fantoma muškog i ženskog pola (sl. 2). Fizičke karakteristike za odraslog fantoma muškog pola su: masa 69.9 kg, visina 170 cm, bočni prečnik trupa je 40 cm, a poprečni 20 cm. Odgovarajuće veličine za fantom ženskog pola su 58.8 kg, 160 cm, 37.6 cm i 18.8 cm. Fantom određuju 4 tkiva: meko tkivo, pluća, ceo skelet i koža, čije su gistine (kg m^{-3}): 987, 296, 1486 i 1105, respektivno. Ovi fantomi se primenjuju u računanju doza organa i tkiva od spoljašnjeg fotonskog zračenja u dijagnostici x-zračenjem, radioterapiji, profesionalnom i prirodnom ozračivanju, korišćenjem metoda Monte Carlo.

GSF pedijatrijski tomografski modeli (GSF Pediatric Tomographic Models -Baby and Child) (Williams et al., 1986, Zankl et al., 1988) predstavljaju tomografske modele za osmonedeljnu bebu i sedmogodišnje dete koji su dobijeni iz CT slika (sl.3). Fizičke dimenzije modela bebe su: starost-8 nedelja, masa 4.2 kg, visina 57 cm, bočni prečnik trupa sa rukama 21.8 cm, a poprečni 12.2 cm, dok su za dete staro 7 godina te dimenzije sledeće: 21,7 kg, 115 cm, 33.1 cm i 17.6 cm. Razlikuju se sledeća tkiva: meko tkivo, koštani oklop, crvena koštana srž (za bebu), crvena koštana srž (za dete) i koža, sa odgovarajućim gustinama (u kg m^{-3}): 987-1050, 296, 1765, 1027, 1006 i 1105, respektivno. Ovi modeli se primenjuju za

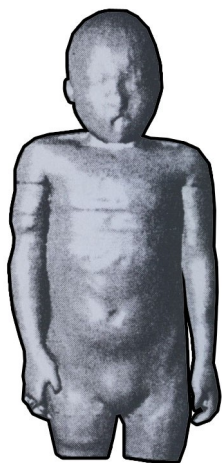
računanje doza organa i tkiva, kao i raspodela apsorbovane doze od spoljašnjeg fotonskog zračenja, u dijagnostici x-zračenjem i radioterapiji.



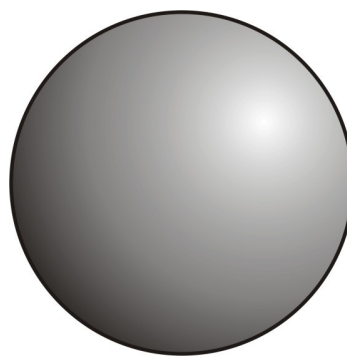
Slika.1. Digitalizovani matematički model (Yamaguchi et al., 1985)

Slika.2. Matematički modeli "Adam i Eva" (Kramer et al., 1982)

ICRU Matematički model sfere (ICRU Spherical Reference Mathematical Model) (ICRU33, 1980; ICRU39, 1985) predstavljen je sferom prečnika 30 cm, čija je masa 14.14 kg (sl. 2.4). U meko tkivo gustine 1000 kg m^{-3} ulaze sledeći elementi: vodonik, ugljenik, azot i kiseonik, u procentnom sastavu: 10.1, 11.1, 2.6 i 76.2%, respektivno. Ovaj model se koristi u zaštiti od zračenja za definisanje operativnih veličina za dozni ekvivalent.



Slika3. Pedijatrijski model



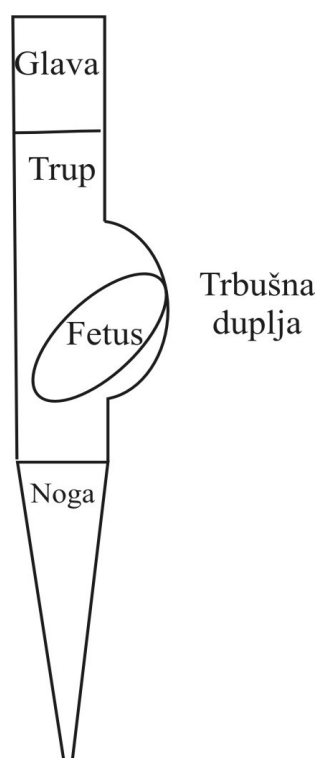
Slika 4. Model ICRU sfere

(Williams et al., 1986, Zankl et al., 1988)

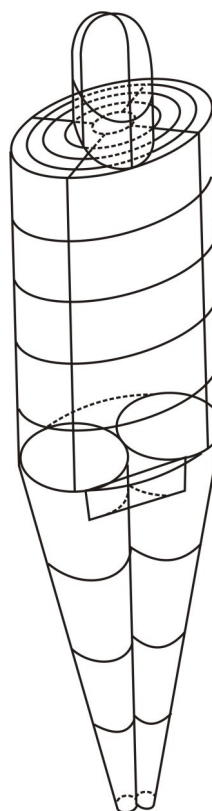
(ICRU33, 1980; ICRU39, 1985)

JAERI Matematički model trudnice u Japanu (JAERI-Japanese Atomic Energy Research Institute, Japanese Pregnant Woman Mathematical Model) (Kai, 1985). Ovaj model je razvijen za trudnice u Japanu, za različite stadijume trudnoće (sl. 5). Osnovu modela čini model Snydera, sa izvesnim izmenama u veličini i abdomenu. Visina modela je 155 cm, a masa 51 kg. Fetus ima sledeće karakteristike, zavisno od stadijuma trudnoće; 1-2 meseca odgovara dužina fetusa 8.6 cm, masa 0.048 kg, od 6 meseci: dužina 21 cm, masa 0.600 kg i za fetus star 9 meseci: dužina je 31.6 cm, masa 2.400 kg. Ovaj model se primenjuje u računanju apsorbovane doze koju primi fetus usled akcidenta na nuklearnom reaktoru primenom metoda Monte Carlo.

MIRD-5 matematički model (MIRD-Medical Internal Radiation Dose Committee) (Snyder et al., 1969, 1978) predstavlja odraslog hermafroditnog fantoma (sl. 6). Fizičke dimenzije su: masa 70 kg, visina 174 cm, trup i ruke (uzdužni diameter) 40 cm trup (poprečni diameter) 20 cm. Ovaj model određuju 3 tkiva: meko tkivo, pluća i skelet (uključujući koštano tkivo, koštanu srž i koštani oklop), gustine (kg m^{-3}): 1000, 300 i 1500, respektivno. Primenjuje se za računanje specifične apsorbovane frakcije od monoenergetskog fotonskog zračenja za odabrane kombinacije izvora i organa meta korišćenjem metoda Monte Carlo.



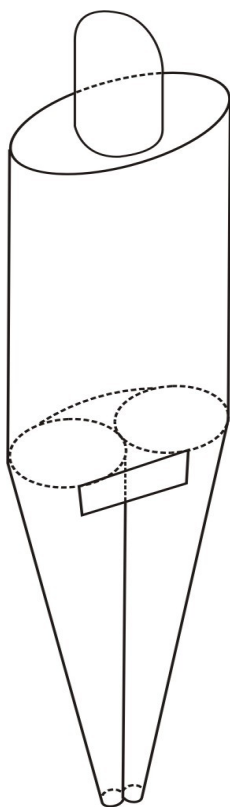
Slika 5. Model trudnice u Japanu
(Kai, 1985)



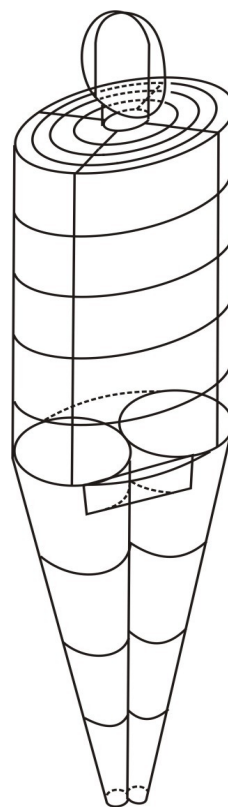
Slika 6. MIRD-5 Matematički model
(Snyder et al., 1969, 1978)

JAERI matematički model (JAERI Mathematical Model -VADMAP) (Yamaguchi et al., 1987) se primenjuje u računanju specifične apsorbovane frakcije monoenergetskog fotonskog zračenja primenom Monte Carlo programa VADMAP (sl.7). Osnovu ovog modela čini ORNL model (Cristy, 1980), sa promenljivim spoljašnjim i unutrašnjim dimenzijama i gustinama tkiva.

ORNL Matematički model Japanca (ORNL Japanese Mathematical Model) (Kerr et al., 1976; Cristy, 1985) predstavlja hermafroditnog odraslog Japanca (sl.8). Ukupna masa i visina modela zasnovani su na podacima više japanskih studija. Fizičke dimenzije modela su sledeće: masa 55 kg, visina 160 cm, trup i ruke 34.5 cm i poprečni dijamer trupa 19.6 cm. Odredjena su 3 tipa tkiva: meko tkivo, pluća i ceo skelet, gustine (kg m^{-3}): 1040, 296 i 1400, respektivno. Ovaj fantom se primenjuje za računanje apsorbovane doze kod potomaka populacije Hirošime i Nagasakija, 1945. i za računanje doza organa i tkiva u dijagnostici i terapijskom ozračivanju u Japanu.

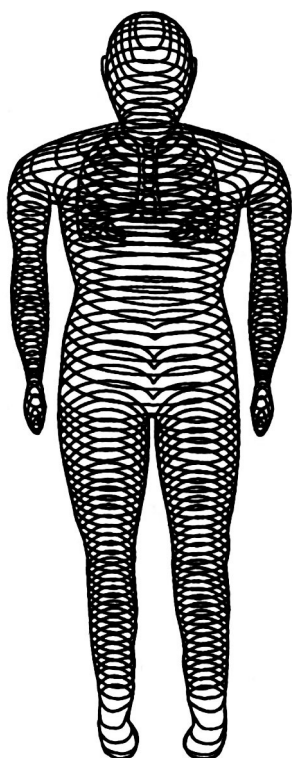


Slika 7. JAERI matematički model
(Yamaguchi et al., 1987)

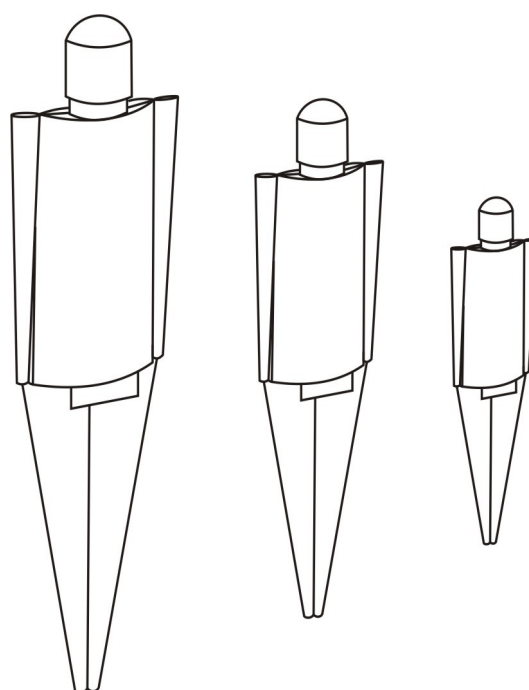


Slika 8. ORNL Matematički model Japanca
(Kerr et al., 1976; Cristy, 1985)

SIAC konturni model čoveka (SAIC-Science Applications International Corporation Adult Contour Mathematical Model) (Kaul et al., 1987) predstavlja čoveka iz severne Amerike. Geometrija i fizičke dimenzije su zasnovane na komercijalnom antropomorfnom fantomu (sl. 9). Model je predstavljen trodimenzionalnom oblašću koja se sastoji iz zapreminskih elemenata. Fizičke dimenzije su sledeće: masa 74 kg, visina 174 cm, uzdužni dijametar grudnog koša 32.8 cm i poprečni dijametar 20.8 cm. Model se primenjuje u računanju fluensa i apsorbovane doze od spoljašnjeg neutronskog i gama zračenja u organu-meti ili ostalim organima od interesa.



Slika 9. SIAC kontura modela čoveka
(Kaul et al., 1987)



Slika.10. SIAC pedijatrijski i odrasli matematički modeli (Kaul et al., 1987)

SIAC pedijatrijski matematički modeli i model odraslog Japanca (SIAC Japanese Pediatric and Adult Mathematical Models) (Kaul et al., 1987) predstavljaju decu različite starosti i hermafroditnog odraslog Japanca (sl. 10). Modeli su bazirani na anatomskim podacima iz nekoliko studija japanske populacije. Ovi modeli se primenjuju za računanje fluensa neutrona i gama zračenja i apsorbovanih doza u 15 organa kod potomaka populacije iz Hiroshime i Nagasakija 1945. godine. Takodje se koriste za računanje doza organa ili tkiva u dijagnostičke i terapijske svrhe.

10. 3. ORNL fantom

U proračunima ovog rada korišćen je ORNL fantom, te je zbog toga ovaj fantom detaljno opisan u tekstu. ORNL serije matematičkog fantoma su razvili Eckerman, Cristy i Ryman u Oak Ridge Laboratory (ORNL) (Cristy, 1980; Cristy & Eckerman, 1987; Eckerman et al., 1996). Fizičke dimenzije ORNL fantoma prikazane su u Tabeli 1.

Tabela 1. Fizičke dimenzije ORNL serija matematičkog fantoma

(Cristy, 1980; Cristy & Eckerman, 1987)

Fantom	Masa (kg)	Visina (cm)	Trup i ruke (cm)	Poprečni dijametar (cm)
Novorođenče	3.60	51.5	12.7	9.8
1 god	9.72	75.0	17.6	13
5 god	19.8	109.0	22.9	15
10 god	33.2	139	27.8	16.8
15 god	56.8	164	34.5	19.6
Odrastao muškarac	73.7	179	40.0	20.0

ORNL serija uključuje fantome za novorođenče, individue stare 1, 5, 10, 15 godina i fantoma odraslog muškarca. 15-godišnji fantom reprezentuje oba roda, muški i ženski. Svaki fantom sastoji se iz tri velike sekcije: (1) eliptički cilindar reprezentuje trup i ruke; (2) dva zarubljena konusa reprezentuju noge i stopala; i (3) kružni cilindar, zajedno sa eliptičkim cilindrom i polovinom elipsoida reprezentuju vrat i glavu. Ženskom fantomu pridodate su grudi, koje su predstavljene sa dva elipsoida. U ORNL fantomu se razmatraju tri tipa tkiva: meko tkivo, skelet i pluća. Elementarni sastav svakog od ovih tkiva dat je u Tabeli 2 zajedno sa odgovarajućom gustinom za sve fantome, izuzev novorođenčeta.

2. 3. 1. Opis delova tela i organa ORNL fantoma

Za definisanje ORNL fantoma, koordinatni sistem je izabran na sledeći način: pozitivan smer z-ose upravljen je naviše prema glavi, x-osa je usmerena ulevo, a y-osa u pravcu napred-nazad, usmerena ka leđjima fantoma. Koordinatni početak je u osnovi trupa. Dimenzije su u cm zaokružene na dve decimale.

Trup kao eliptički cilindar predstavlja se jednačinom:

$$\left(\frac{x}{A_T}\right)^2 + \left(\frac{y}{B_T}\right)^2 \leq 1 \quad 0 \leq z \leq C_T, \quad (1)$$

gde su vrednosti parametara A_T , B_T i C_T za svaki fantom date u Tabeli 2.3.

Tabela 2. Elementi koji ulaze u sastav tkiva ORNL fantoma
(Eckerman et al., 1996)

Element (%)	Meko tkivo	Skelet	Pluća
H	10.454	7.337	10.134
C	22.663	25.475	10.238
N	2.490	3.057	2.866
O	63.525	47.893	75.752
F	0	0.025	0
Na	0.112	0.326	0.184
Mg	0.013	0.112	0.007
Si	0.030	0.002	0.006
P	0.134	5.095	0.080
S	0.204	0.173	0.225
Cl	0.133	0.143	0.226
K	0.208	0.153	0.194
Ca	0.024	10.190	0.009
Fe	0.005	0.008	0.037
Zn	0.003	0.005	0.001
Rb	0.001	0.002	0.001
Sr	0	0.003	0
Zr	0.001	0	0
Pb	0	0.001	0
Gustina (g/cm^3)	1.04	1.4	0.296

Deo trupa uključuje i ruke, dok su za ženski fantom grudi dodate spolja na sekciju trupa.

Tabela 3. Parametri koji definišu trup u ORNL seriji fantoma (Eckerman et al., 1996)

Fantom	Dužina (cm)			Zapremina (cm^3)	Masa (g)
	A_T	B_T	C_T		
Novorođenče	6.35	4.90	21.60	2 050	2 030
1 god	8.80	6.50	30.70	5 350	5 350
5 god	11.45	7.50	40.80	10 660	10 650
10 god	13.90	8.40	50.80	18 050	18 130
15 god	17.25	9.80	63.10	32 920	33 500
Odrastao muškarac	20.00	10.00	70.00	43 090	43 470

Glava uključuje vrat, koji je predstavljen kružnim cilindrom (nejednakosti 2).

$$x^2 + y^2 \leq R_H^2 \quad C_T \leq z \leq C_T + C_{H0} \quad (2. 2)$$

Sama glava sastoji se od eliptičnog cilindra, a povrh njega je polu-elipsoid (nejednakosti 3 i 4).

$$\left(\frac{x}{A_H}\right)^2 + \left(\frac{y}{B_H}\right)^2 \leq 1 \quad C_T + C_{H0} \leq z \leq C_T + C_{H0} + C_{H1} \quad (3)$$

$$\left(\frac{x}{A_H}\right)^2 + \left(\frac{y}{B_H}\right)^2 + \left(\frac{z - (C_T + C_{H0} + C_{H1})}{C_{H2}}\right)^2 \leq 1 \quad z \geq C_T + C_{H0} + C_{H1} \quad (4)$$

Parametri koji definišu glavu u ORNL fantomu prikazani su u Tabeli 4.

Noge se za svaki iz serija ORNL fantoma sastoje od dva kružna konusa, koji se mogu predstaviti sledećom nejednačinom:

$$x^2 + y^2 \leq \pm x \left(A_T + \frac{A_T}{C_L} z \right) - C_L \leq z \leq 0, \quad (2.5)$$

gde se znak + uzima za levu, a – za desnu nogu. Odgovarajući parametri su dati u Tabeli 5.

U ORNL seriji fantoma koža se predstavlja slojem debljine 0.2 cm koji spolja obavija fantoma. Glavni organi su: organi gastrointestinalnog trakta (jednjak, želudac i debelo crevo), jetra, pluća, gonade (testisi i ovarijumi), tiroida i bešika, skeletni sistem (površina kosti i crvena koštana srž) i grudi za fantom ženskog pola.

Skeletni sistem kod ORNL serije fantoma sastoji se od 8 delova: kosti nogu i ruku, karlica, kičma (gornji, srednji i donji deo), lobanja (čine je kosti lobanje i lica), rebra, ključne kosti i lopatice. Regionalna raspodela aktivne (hematopoietic) i inaktivne (fatty) koštane srži u velikoj meri zavisi od godina fantoma (Tabela 6). Ukupna masa skeleta odraslog fantoma je 10000 g, od čega je 3500 g masa koštane srži (masa aktivne koštane srži je 1120 g a inaktivne 2380 g).

VOXEL фантом

Током година са појавом СТ скенера и MRI уређаја уведена су веома значајна побољшања модела људског тела. Модели прве генерације тзв. стилизовани модели садржали су грубе репрезентације унутрашњих органа обухватајући само најопштији опис положаја и геометрије органа. Стилизовани фантоми обезбеђују само основне информације са великим степеном грешке. Компјутеризована томографија (СТ скенер) и магнетна резонанца (MRI) генеришу веома прецизне слике унутрашњих органа у три димензије и у дигиталном формату. Научници су открили да могу користити те дијагностичке податке и трансформисати их у voxel (запремински пиксел) формат, тј креирајући људско тело у дигиталном облику у 3D. Voxel фантоми претстављају фантоме друге генерације.

Два главна питања која су се наметнула са развојем фантома су тешкоће у добијању корисних слика и руковање великом количином података креираних слика. СТ скенири предају људском телу велику дозу зрачења – што је у супротности са сврхом постојања фантома јер су они дизајнирани да би се на првом месту примљене дозе љрачења свеле на минимум. Да би се обрадили MRI снимци потребно је доста времена. Руковање тако добијеним подацима је веома тешко. Новији рачунари имају хард дискове довољно велике за складиштење добијених података, а такође испуњавају меморијске захтеве за обраду слике до величине жељеног воксела.

Voxel фантоми се користе у многим различитим симулацијама као што су процене дозе од x зрачења, од унутрашњег озрачивања, одређивање конверзионих фактора и у микродозиметрији.

Постоји више различитих процеса развоја voxel фантома, али сви они прате сличну путању. Први корак је да се добију сирови подаци са СТ скенера и MRI уређаја. Други корак је да компоненте тела морају бити уситњене, тј идентификоване одвојено од осталих. Треће, густина сваке компоненте мора бити идентификована, заједно са саставом компоненте. На крају, подаци морају бити обједињени у једну 3D структуру тако да се могу користити за анализу.

Крамер [8] је са својом екипом објавио рад који претставља упутство за креирање и управљање voxel фантомима.

У свету па и код нас постоји стандард по коме се снимци са СТ скенера и MRI уређаја чувају у DICOM формату (Digital Imaging and Communications in Medicine).

10. 4. Odredjivanje raspodele apsorbovane doze u antropomorfnim i drugim fantomima

Računanje raspodele apsorbovane doze zahteva poznavanje i razumevanje sledećih uslova ozračivanja:

- detalji fantoma (modela) ljudskog tela;
- poznavanje geometrije i uslova ozračivanja tela;
- metode računanja interakcije zračenja sa tkivom tela i transport zračenja kroz telo.

Raspodela apsorbovane doze i odnos doze i veličina u telu ili kompjuterskom modelu zavise od spektra energije i ugaone raspodele upadnog zračenja i orijentacije tela u polju zračenja. Raspodela apsorbovane doze zavisi od karakteristika ljudskog tela (mase, visine pola, starosti).

Eksperimentalni pristup zahteva konstrukciju realističnog fantoma ljudskog tela korišćenjem tkivu ekvivalentnog materijala i primenu kompjuterskih programa.

Polje zračenja se definiše pravcem i raspodelom energije svih čestica od kojih se sastoji. Referentno polje zračenja je određeno kvantitativnim veličinama; Kerma u vazduhu (air kerma free-in-air) za fotone i fluens za neutrone. Polje zračenja je uvek kompleksno i određivanje doze u organima može biti komplikovano i neodređeno. Jedan od uzroka neodređenosti je neuniformnost polja zračenja u odnosu na ljude koji su tom polju izloženi.

U slučaju naelektrisanih čestica najveći deo računanja bi trebalo prilagoditi da postoji ravnoteža naelektrisanih čestica u tački od interesa uz primenu "Kerma aproksimacije". "Kerma aproksimacija" pretpostavlja da je u bilo kojoj tački od interesa u fantomu, sekundarno zračenje i naročito naelektrisane čestice u ravnoteži sa primarnim zračenjem. U tom slučaju apsorbovana doza je jednaka tkivnoj Kermi, umanjenoj za energiju odnetu nanaelektrisanim česticama (zakočno zračenje ili neutroni). Sa izuzetkom neutrona iznad 20 MeV, "Kerma aproksimacija" se koristi u svim računanjima.

Za slučaj fotona, "Kerma aproksimacija" pretpostavlja da su sekundarni elektroni u ravnoteži sa primarnim elektronima u tački od interesa u fantomu, i da je dozni ekvivalent jednak "tkivnoj Kermi" umanjenoj za gubitke na zakočno zračenje. Za fotone aproksimacija važi za energije do 3 MeV. U slučaju većih energija ravnoteža se narušava. Za fotone sa energijama iznad 3 MeV neophodno je uzeti u obzir zračenje rasejano u vazduhu i jaku zavisnost od geometrije izvora i mete. Ovo se postiže korišćenjem slojeva za nagomilavanje sa pogodno izabranom debljinom.

10. 5. Transportni programi: opšte karakteristike i specijalni programi

Proračun doza u organima ljudskog tela podrazumeva rad sa vrlo komplikovanim geometrijama. Analitički je nemoguće izračunati doze u organima ljudskog tela, čak i ako su uslovi ozračivanja vrlo precizno definisani (što često nije slučaj). Zato se koriste kompjuterski programi koji su u najvećem broju slučajeva zasnovani na metodama Monte Carlo (Sobolj, 1973; Ilić, 1991).

Monte-Carlo metoda je proizvod rada istraživača u Los Alamosu za vreme Drugog svetskog rata. Pronalazak metode se generalno pripisuje von Neumannu, Ulamu, Fermiju, Metropolisu i Richtmyeru. Monte-Carlo metod je postao dostupan javnosti 1949. godine kada su J. von Neumann i S. Ulam objavili monografiju Monte-Carlo Methods. Metod je dobio ime po poznatom kockarskom gradu u Monaku, s obzirom da je rulet jedan od najjednostavnijih mehaničkih uređaja za generisanje slučajnih brojeva. Monte-Carlo je numerički metod rešavanja složenih matematičkih, fizičkih, statističkih i drugih problema pomoću slučajnog izbora uzoraka. Monte-Carlo metod temelji se na stohastici prirodnih procesa čija su stanja određena zakonima verovatnoće. Teorijske postavke o pojavama koje se tretiraju i raspodelama verovatnoće slučajnih veličina koje ih uslovljavaju čine osnovu primene Monte-Carlo metoda za numeričke eksperimente.

Jedan od veoma značajnih segmenata Monte-Carlo metoda je generisanje slučajnih brojeva. Pošto uspešnost primene ovog metoda zavisi od kvaliteta upotrebljenih slučajnih brojeva, velika pažnja se posvećuje matematičkim algoritmima za njihovo generisanje.

Uloga Monte-Carlo simulacija naglo je dobila na značaju sa razvojem računara. Tako se zajedno sa teorijom i eksperimentom, metod simulacija ravnopravno koristi pri rešavanju veoma komplikovanih naučnih problema.

Monte-Carlo metod se danas primenjuje u planiranju i izvodjenju radioterapije, pri dizajniranju nuklearnih reaktora, za ispitivanje strukture polimera, proteina, metalnih i poluprovodničkih tankih slojeva itd.

Primena metoda Monte-Carlo na računanje doza u ljudskom telu podrazumeva poznavanje interakcije zračenja i materije (u ovom slučaju tkiva).

Za računanje srednje vrednosti doza u organima, dimenzije razmatranih zapremina su u većini slučajeva dovoljno velike te se koristi kerma aproksimacija, koja je primenljiva za fotone energija do 3 MeV i za neutrone do 20 MeV. Za fotone, prema (Drexler et al., 1989) postoji slaganje oko 5 % za računanje doza organa sa kerma aproksimacijom i modelovanjem primenom pojednostavljene CSDA aproksimacije. Za neutrone, primenjivost kerma

aproksimacije je ograničena dometom uzmaknutih protona, koji je za vodu oko 1.2 mm za energije protona 10 MeV i 4.3 mm za 20 MeV.

Pod uslovom da je domet naelektrisanih čestica u sekundarnim prcesima mali kada se uzme u obzir veličina razmatrane zapremine, jedna od procena apsorbovane doze je srednja vrednost pri "Kerma aproksimaciji".

Elektroni trpe mnogo više interakcija duž svog puta nego nenaelektrisane čestice, fotoni i neutroni. Interakcije elektrona mogu biti opisane terminima, kao što je zaustavna moć, domet i rasipanje dometa. Putevi čestica su podeljeni na segmente duž kojih se dešava mnogo elastičnih i neelastičnih Kulonovih sudara. Ovo se dopušta za tretman kombinovanih efekata mnogih sudara koji se javljaju duž svakog segmenta puta bez uzorkovanja velikog broja individualnih interakcija. Gubici energije su uračunati korišćenjem CSDA i raspodele gubitaka energije rasipanjem; ugaono rasejanje je uračunato korišćenjem raspodele višestrukog rasejanja.

Najpoznatiji programi su:

DEEP (Yamaguchi,1991) je kompjuterski program, sa Monte-Carlo programom MORSE-CG (Emmett, 1975). DEEP omogućava računanje efektivne i ekvivalentne doze modifikovanog MIRD- fantoma odrasle osobe za fotone energija u opsegu od 6.2 keV do 12 MeV.

EGS4 (electron-gamma shower - pljuskovi Elektrona i gama) (Ford i Nelson, 1978) je dat u dve značajne verzije:

EGC4 () program* primenjuje teoriju višestrukog rasejanja elektrona i jednostavan transport fotona, verzija opisana u radu (Nelson et al. 1985).

*EGS4 (**) program* predstavlja poboljšanu verziju EGS4 (*) programa. Najvažnije modifikacije su sledeće:

- korišćenje novih algoritama, koji omogućavaju bolji tretman u transportu elektrona niskih energija;
- modelovanje slučajnih veličina sa boljom efikasnošću;
- primena paralelnog programiranja;
- interakcije fotona su ugrađene u model.

ETRAN (transport elektrona) je tip "kondenzovane istorije" Monte-Carlo programa (Berger i Hubbell, 1987) u kome se energija sudara gubi u svakom kratkom segmentu putanje i uzorkovanje se vrši iz Landau raspodele i korišćenjem zaustavih moći (ICRU Report 37, 1984).

FANEUT je Monte Carlo program razvijen za izračunavanje apsorbovane doze neutrona i sekundarnih fotona u materijalima, koji su ekvivalentni tkivima. Koristi se

jednodimenzionalna geometrija da tretira ploče i sfere. Anizotropija i kinematika elastičnog rasejanja neutrona su aproksimirane Legendre polinomima petog-reda. Neelastično rasejanje je tretirano korišćenjem grupnih efikasnih preseka. Za termalne neutrone primenjen je model gasa kombinovan sa eksperimentalnim podacima za efikasni presek vodonika u vodi (Biskpchuk et al, 1987).

GSF (Gesellschaft für Strahlenforschung) program je originalno razvijen u ORNL laboratoriji pod imenom ALGAM, a kasnije je preimenovan u GSF (Kramer, 1979). Ovaj program računa dozu koju deponuju fotoni iz spoljasnog ili unutrašnjeg izvora u raznim presecima fantoma za različite medijume (fantom je MIRD, voksel, sfera ili ploča).

HADRON je Monte Carlo program namenjen da računa kaskadni transport hadrona u kompleksnim vodoničnim medijumima, baziran na modelu kaskadno-ekscitonskih neelastičnih nuklearnih interakcija (Golovachik et al, 1989).

HL~PH program je namenjen za neutrone i fotone i koristi standardne Monte Carlo metode (sa nekom tehnikom redukcije varijanse) i kombinatornu geometriju. Efikasni preseki su zasnovani na ENDF/BIV bibliotekama. Fantomi su modelovani pomoću programa prikazanih u radu (Kramer et al., 1982).

JEUNESSE je kompjuterski program koji je koristio Yamaguchi gde je inkorporiran program Monte-Carlo MORSE-CG (Emmett, 1975). YEUNESSE (Yamaguchi, 1992) sadrži fantome zavisne od starosti i računa ekvivalentne i efektivne doze u odgovarajućim modelima koji odgovaraju 0, 1, 5, 10 i 15 godina i fantomu odrasle osobe.

LAHET program (Los Alamos High-Energy Transport code) je modifikovana verzija programa (HETC) za visoko-energetski transport (Prael and Lichtestein, 1989). Ovaj program omogućava transport neutrona, fotona i jezgara lakših od ^4He . Mogućnosti geometrije su slične kao kod MCNP programa.

MORSE –CG program (Emmett, 1975) je jedan od prvih Monte- Carlo transpornih programa sa širokom primenom i ima različite mogućnosti geometrije. Ovaj program koristi grupne efikasne preseke, ali sa jednim nedostatkom: ograničena mogućnost za tretiranje problema sa detaljnom strukturom u efikasnim presecima (kao što su rezonance).

GEANT program (Brun et al., 1987) se koristi za Monte-Carlo simulaciju različitih procesa u oblasti nuklearne fizike i fizike elementarnih čestica. Program je razvijen u CERN-u (European Organization for Nuclear Research) u Ženevi i koristi se za pripremu, realizaciju i analizu eksperimenata. GEANT se najčešće primenjuje za: dizajniranje i optimizaciju detektora, razvoj i proveru drugih računarskih programa koji se koriste za analizu eksperimentalnih podataka i interpretaciju eksperimentalnih podataka.

MCNP program je opšti program, koji može da se koristiti u transportu zračenja za probleme u komplikovanim trodimenzionalnim konfiguracijama. Nove verzije olakšavaju računanja transporta elektrona. U kasnijem tekstu dato je više informacija o ovom programu.

MCNP-BO program sastoji se iz MCNP-3A verzije programa (Briesmeister, 1986) i modifikovan je tako da uključuje transport elektrona (Guaraldi and Padoani, 1994).

MCNP4 program (Briesmeister, 1991) omogućava simulaciju transporta fotona, neutrona i elektrona u vrlo kompleksnim geometrijama. U programu se koristi Goudsmit-Saundersonova teorija višestrukog rasejana. Detaljni tretman fizike rasejanja niskoenergetskih elektrona primenjuje se na elektrone ispod 1 keV.