

Procena doza kosmičkog zračenja korišćenjem Monte Karlo simulacija

Jovana Knežević Radić
Prirodno-matematički fakultet
Univerzitet u Novom Sadu
Novi Sad, Srbija
jovana.knezevic@df.uns.ac.rs

Kristina Demirhan
Prirodno-matematički fakultet
Univerzitet u Novom Sadu
Novi Sad, Srbija
kristina.bikit@df.uns.ac.rs

Dušan Mrđa
Prirodno-matematički fakultet
Univerzitet u Novom Sadu
Novi Sad, Srbija
mrdjad@df.uns.ac.rs

Jan Hansman
Prirodno-matematički fakultet
Univerzitet u Novom Sadu
Novi Sad, Srbija
jan.hansman@df.uns.ac.rs

Sofija Forkapić
Prirodno-matematički fakultet
Univerzitet u Novom Sadu
Novi Sad, Srbija
sofija@df.uns.ac.rs

Danijel Velimirović
Prirodno-matematički fakultet
Univerzitet u Novom Sadu
Novi Sad, Srbija
danijel.velimirovic@df.uns.ac.rs

Predrag Kuzmanović
Akademija strukovnih studija
Šabac, Srbija
predrag.kuzmanovic@df.uns.ac.rs

Izloženost ljudske populacije prirodnom jonizujućem zračenju je kontinualni i nezaobilazni deo života na Zemlji. Najveći doprinos izloženosti populacije potiče od kosmičkog zračenja i radionuklida prisutnih u Zemljinoj kori. Prosečna izloženost kosmičkom zračenju doprinosi sa oko 16% ukupnoj godišnjoj efektivnoj dozi koja potiče od prirodnog zračenja, sa prosečnom vrednošću od oko 0,4 mSv godišnje. Procena doze koja potiče od izloženosti ljudske populacije kosmičkom zračenju je neophodna kako bi se bolje razumela celokupna izloženost prirodnom radioaktivnom zračenju. U ovom radu korišćen je Monte Karlo metod u Geant4 simulacionom paketu radi procene jačina apsorbovanih doza i godišnjih efektivnih doza kosmičkog zračenja na nivou mora i na različitim nadmorskim visinama. Procenjene su i efektivne doze koje primi pojedinac u slučaju nekoliko tipičnih letova. Dobijeni rezultati su upoređeni sa rezultatima sličnih studija dostupnih u literaturi.

Ključne reči—kosmičko zračenje, Monte Karlo simulacije, jačina apsorbovane doze, efektivna doza

I. UVOD

Izloženost ljudske populacije dejstvu jonizujućeg zračenja je sastavan deo života na planeti Zemlji. Dva dominantna izvora prirodnog jonizujućeg zračenja su kosmičko zračenje, koje čine čestice visokih energija, i radionuklidi u Zemljinoj kori. Primarno kosmičko zračenje se sastoji od protona i alfa čestica, dok elementi sa rednim brojem većim od 3 čine samo mali udeo primarnog kosmičkog zračenja. Tokom prolaska kosmičkog zračenja kroz atmosferu, ono proizvodi sekundarne čestice – mione, neutrone, elektrone, pozitrone i fotone, mahom kroz elektromagnetne i hadronske kaskade. Prosečna izloženost kosmičkom zračenju doprinosi sa 16% ukupnoj godišnjoj efektivnoj dozi koja potiče od prirodnih izvora, posmatrano na nivou mora, sa prosečnim vrednostima od 0,4 mSv i tipičnim opsegom od 0,3 do 1,0 mSv [1]. Na većim visinama, kosmičko zračenje je dominantan izvor jonizujućeg zračenja. Na nivou mora mionska komponenta doprinosi sa najvećim udelom, dok su na većim visinama dominantna komponenta neutroni.

Izloženost kosmičkom zračenju, odnosno njegov uticaj na primljene doze, je zavisna od visine na kojoj se posmatra, dok slabo zavisi od geografske širine i solarne aktivnosti [1, 2]. Procena doze koja potiče od kosmičkog zračenja je neophodna kako bi se u potpunosti razumela izloženost ljudske populacije svim izvorima prirodnog zračenja.

Izvođenja direktnih merenja doza kosmičkog zračenja na nivou mora nisu jednostavna iz razloga što je potrebno isključiti doprinos okolnih terestrijalnih radioizotopa, kao i efekte rasejanja [3]. S druge strane, na tipičnim visinama na kojima se obavlja većina letova, moguće je izvršiti merenja ličnim dozimetrima [4, 5]. Korišćenjem Monte Karlo simulacionog metoda, moguće je proceniti jačine apsorbovanih doza [6, 7] na različitim visinama, kao i na različitim geografskim širinama. U ovom radu, Geant4 simulacioni paket je korišćen da bi se izvele Monte Karlo simulacije kosmičkog zračenja na nivou mora i dve različite visine (2 100 i 11 300 m), kao i na različitim geografskim širinama (30°, 45° i 65°). Ljudsko telo je predstavljeno vodenim cilindrom mase 75 kg. U sastav kosmičkog zračenja uključeni su mioni, neutroni, elektroni, pozitrone, fotoni, proton i pioni. Ukupna jačina apsorbovane doze je dobijena određivanjem ukupne deponovane energije u vodenom cilindru. Dodatno, uzimajući u obzir nekoliko tipičnih letova sa beogradskog aerodroma i njihovo prosečno trajanje, nađene su doze koje primi pojedinac. Rezultati su upoređeni sa rezultatima dobijenim u sličnim studijama.

II. MONTE KARLO SIMULACIJE I GEANT4

Monte Karlo metod je široka klasa algoritama koji koristi slučajno birane događaje sa ciljem dobijanja numeričkog rešenja nepoznatih parametara. Ovaj metod se koristi za rešavanje brojnih problema u fizici, matematici, statistici i drugim oblastima. Metod je pogodan za analizu sistema sa velikom brojem stepeni slobode, stoga se koristi za procese u nuklearnoj fizici i fizici visokih energija, a veliku primenu je našao i u opisivanju složenih geometrija, poput modernih detektorskih sistema u fizici visokih energija [8].

Do danas je razvijen veliki broj različitih kodova koji koriste opisani metod Monte Karla. Neki od njih su MCNPX, Geant, FLuka, Mars, Phits... *Geant4* softverski paket je razvijen još 1993. godine u dve nezavisne studije u CERN-u i KEK-u. U ovom paketu je moguće definisati geometriju sistema, odabrati materijale, čestice, fizičke procese, a potom i zabeležiti odgovor detektora, generisati podatke o događajima, skladištiti događaje i putanje i analizirati podatke. *Geant4* nudi mogućnost da korisnik sam napiše program koji će biti prilagođen potrebama simulacije. Korisnik može da konstruiše detektor, što podrazumeva definisanje elemenata detektora (oblika, veličine, položaja), materijala koji se nalaze u sastavu detektora, zatim osetljivih oblasti detektora (deo detektora koji će vršiti detekciju signal) i osobine elektronike [8]. Na Slici 1 je prikazan jedan deo koda kojim se zadaju karakteristike detektora korišćenog u proceni doza kosmičkog zračenja, o čemu će biti reči kasnije. Pored konstrukcije detektora, potrebno je odabrati fizičke procese i čestice koje će učestvovati u interakcijama. Dodatno se mogu odabrati parametri koji će da definišu praćenje čestice i događaja, kroz definisanje veličina *range cut* i *energy cut*, što omogućava korisniku da se ograniči na manji ili veći broj događaja koji će biti detektovan u simulaciji. Moguća je i vizualizacija putanja čestica, a primer jedne vizualizacije interakcija različitih čestica kosmičkog zračenja je dat na Slici 2.

III. SIMULACIJE KOSMIČKOG ZRAČENJA

U cilju određivanja jačina apsorbovanih doza, kao i godišnje efektivne doze izvršene su Monte Karlo simulacije korišćenjem *Geant4* simulacionog softvera (verzija 4.9.5) [9]. Na Slici 2 je prikazana postavka konstruisana u simulacijama. Ljudsko telo je predstavljeno vodenim cilindrom dimenzija: poluprečnika 40 cm i visine 15 cm, a ukupne mase 75 kg. Vodeni cilindar je imao ulogu detektora, kako bi se mogao dobiti spektar deponovane energije unutar njegove zapremine. Deo koda korišćen za konstrukciju detektora u simulacijama je prikazan na Slici 1. Čestice kosmičkog zračenja su emitovane iz kvadratne površine dimenzija 1 m × 1 m, postavljene tik uz gornju površinu vodenog cilindra. Odabrane čestice su bile mioni, neutroni, elektroni, pozitroni, fotoni, protoni i pioni. Ukupan broj emitovanih događaja u svim simulacijama je iznosio $5 \cdot 10^6$.

Energijska i ugaona distribucija su korišćene iz baze *CRY Shower Library* unutar *Geant4* softverskog paketa [10], oslikavajući realističnu distribuciju emitovanih čestica. Takođe, uključena je višestruka emisija, tako da je bilo moguće da se u toku jednog događaja emituje više čestica. Imajući u vidu da promene u solarnoj aktivnosti utiču na fluks čestica, a shodno mogućnosti da budu uključene u *Geant4* paketu, ulazni datum je podešen na 17. avgust 2020. godine, uzimajući na taj način u obzir odgovarajuće vrednosti fluksa čestica.

Simulacije su sprovedene za tri različite visine: 0, 2 100 i 11 300 m. Visina od 0 m odgovara nivou mora, a odgovarajuća jačina apsorbovane doze dobijena na nivou mora je u suštini najbitnija za izloženost populacije.

Takođe, simulacije su izvedene za tri različite geografske širine 30°, 45° i 65°, kako bi se ispitao uticaj geografske širine na vrednosti jačina apsorbovanih doza.

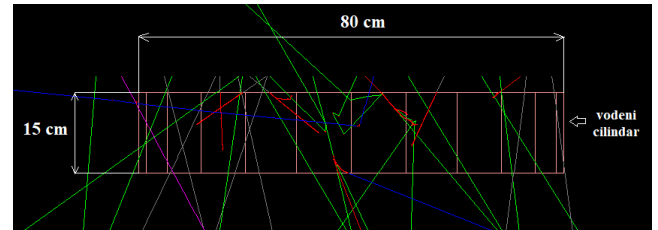
```
DetectorRadius=400*mm; DetectorHeight=150*mm;

z[0]=0*mm; z[1]=z[0]+DetectorHeight;      r[0]=0*mm; r[1]=0*mm;      R[0]=DetectorRadius; R[1]=DetectorRadius;

//G4ThreeVector positionDetector = G4ThreeVector(0,0,0.5*mm);

G4ThreeVector positionDetector = G4ThreeVector(0,0,960*mm);
DetectorMater = materialsManager->GetMaterial("G4_WATER");
solidDetector = new G4Polycone("detector",0.,twopi,2.,r,R);
logicDetector = new G4LogicalVolume(solidDetector,DetectorMater,"Detector",0,0,0);
physDetector = new G4PPlacement(0, positionDetector, logicDetector,"Detector",logicWorld,false,0);
LogicDetector->SetSensitiveDetector(SD);
ScoringVolumeMass=logicDetector->GetMass();
```

Slika 1 Deo koda kojim su zadate karakteristike detektora u simulacijama.



Slika 2 Postavka u simulacijama. Obeležene su dimenzije vodenog cilindra. Prikazane su putanje čestica: fotoni (zeleni), elektroni (crveni), pozitroni (plavi), mioni (ljubičasti), neutroni (sivi).

Iz liste fizičkih procesa, odabrani su elektromagnenti i hadronski procesi. Stoga, svi procesi koji su rezultat interakcije emitovanih čestica sa vodenim cilindrom su uzeti u obzir, te je prema tome deponovana energija unutar vodenog cilindra suma svih pojedinačnih deponovanih energija koje su rezultat odigranih procesa. Vrednost *range cut*-a je bila podešena na 1 000 nm, dok je *energy cut* bio podešen na 1 keV. *Range cut* je vrednost koja definiše rastojanje koje sekundarna čestica pređe između dve interakcije, a koje će biti registrovano u simulacijama, dok *energy cut* predstavlja vrednost praga kojim se definiše najmanja energija kreirane sekundarne čestice koja će biti registrovana u detektoru u simulacijama. Jačina apsorbovane doze u vodenom cilindru je određena korišćenjem relacije (1):

$$\dot{D} = \frac{E}{m_{cilindra} \cdot t_{eq}} \quad (1)$$

gde je E ukupna energija deponovana u vodenom cilindru, $m_{cilindra}$ masa vodenog cilindra i t_{eq} ekvivalentno vreme (vreme koje je potrebno u realnosti za emisiju odabranog broja emitovanih čestica). Ekvivalentno vreme je izračunato korišćenjem relacije (2), koja povezuje emitovani broj čestica N , fluks čestica ϕ_{μ} i emisionu površinu S :

$$t_{eq} = \frac{N}{\phi_{\mu} S} \quad (2)$$

Godišnja efektivna doza E za populaciju se može proceniti korišćenjem relacije (3), uzimajući u obzir pretpostavku da je prosečno vreme koje pojedinac provede spolja 20% od ukupnog vremena u jednoj godini [11]:

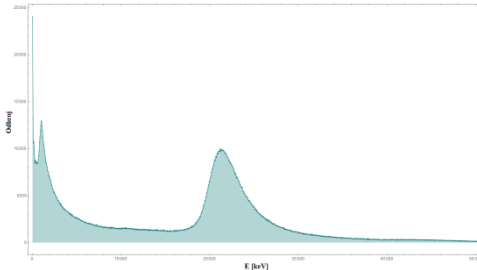
$$E = 0,7 \text{ Sv Gy}^{-1} \cdot \dot{D} \cdot 0,84 \cdot t \quad (3)$$

gde je $0,7 \text{ Sv Gy}^{-1}$ faktor konverzije dobijenih vrednosti jačine apsorbovane doze u vazduhu u eksternu efektivnu dozu za odrasle, a t iznosi 365 dana (8760 h).

IV. REZULTATI I DISKUSIJA

Spektar dobijen u simulacijama, na primeru emisije $5 \cdot 10^6$ događaja na nivou mora (0 m nadmorske visine) i 45° geografske širine, prikazan je na Slici 3.

Na osnovu dobijenih spektara iz simulacije, moguće je bilo odrediti jačine apsorbovanih doza korišćenjem relacije (1) i godišnje efektivne doze korišćenjem relacije (3). U Tabeli 1 su prikazani dobijeni rezultati za različite visine i geografske širine.



Slika 3 Spektar deponovane energije dobijen unutar vodenog cilindra u simulacijama.

TABELA 1 JAČINE APSORBOVANIH DOZA I GODIŠNJE EFEKTIVNE DOZE DOBIJENE NA OSNOVU REZULTATA SIMULACIJE, ZA RAZLIČITE NADMORSKE VISINE I GEOGRAFSKE ŠIRINE.

Nadm. visina [m]	Đ [$\mu\text{Gy h}^{-1}$]			E [mSv]		
	Geografska širina [$^\circ$]			Geografska širina [$^\circ$]		
	30	45	65	30	45	65
0	0,023	0,023	0,023	0,12	0,12	0,12
2100	0,089	0,089	0,089	0,46	0,46	0,46
11300	6,85	4,96	3,27	35,3	25,50	16,80

Za odabranih par letova, procenjene su prosečne doze koje primi pojedinac pri jednom letu, uzimajući u obzir jačine apsorbovanih doza na visinama od 11 300 m. S obzirom da su na ovoj visini neutroni dominantna komponenta kosmičkog zračenja, za težinski faktor je uzeta vrednost 5 [11]. Imajući u vidu da se prilikom nekih letova značajnije menja geografska širina početnog i krajnjeg mesta, za srednju vrednost jačine apsorbovane doze uzeta je aritmetička sredina vrednosti jačina apsorbovanih doza na geografskim širinama, koje odgovaraju tim mestima. U Tabeli 2 prikazane su vrednosti procenjenih efektivnih doza za par odabranih letova i to u slučaju jednog povratnog leta u toku dve godine.

S obzirom da je poznato da solarna aktivnost utiče na fluks čestica kosmičkog zračenja, sprovedene su simulacije u kojima su datumi izabrani tako da odgovaraju periodu u toku minimuma solarne aktivnosti (01.07.2020. godine) i maksimuma solarne aktivnosti (01.07.2025. godine), na nivou mora i odabranoj geografskoj širini od 45° . Dobijeno je odstupanje manje od 1% u slučaju jačina apsorbovanih doza, sa statistikom od $5 \cdot 10^6$ emitovanih događaja.

Na osnovu rezultata prikazanih u Tabeli 2, može se zaključiti da jačina apsorbovane doze slabo zavisi od geografske širine [1], pri čemu se značajnija razlika javlja samo u slučaju visine od 11 300 m. S druge strane, jačine apsorbovanih doza se značajno razlikuju u slučaju različitih nadmorskih visina, te su na visini od 11 300 m gotovo 200 puta veće nego u slučaju nadmorske visine koja odgovara nivou mora.

TABELA 2 EFEKTIVNA DOZA KOJU PRIMI POJEDINAC U TOKU NEKOLIKO ODABRANIH LETOVA.

Let	Trajanje leta [h]	Đ [$\mu\text{Gy h}^{-1}$]	E [mSv]
Beograd–Njujork	10	4,96	0,25
Beograd–Helsinki	4,25	4,12	0,09
Beograd–Hurgada	3,50	5,90	0,10
Beograd–London	3	4,96	0,07
Beograd–Moskva	2,75	4,96	0,07
Beograd–Banja Luka	0,80	4,96	0,02

Dobijena vrednost jačine apsorbovane doze na nivou mora na osnovu simulacionih rezultata (23 nGy h^{-1}) pokazuje relativno odstupanje od $\approx 30\%$ od vrednosti date u [2, 11], a koja iznosi 32 nGy h^{-1} . Relativno dobra slaganja (ispod 30%) su dobijena sa rezultatima u radovima [1, 12]. Na visinama koje odgovaraju avionskim letovima, dobijene su jačine apsorbovanih doza u opsegu ($4,12\text{--}5,90$) $\mu\text{Gy h}^{-1}$, koje su nešto više u odnosu na vrednosti dobijene u radu [4, 5]. Odstupanja dobijenih vrednosti jačina apsorbovanih doza u simulacijama od eksperimentalnih vrednosti dobijenih u radovima se mogu objasniti činjenicom da prilikom direktnih merenja doza kosmičkog zračenja nije u potpunosti moguće isključiti doprinos okolnih gama emitera, kao i uticaj rasejanog zračenja. Dobijene jačine apsorbovanih doza (Đ) za nekoliko tipičnih letova (Tabela 2) ukazuju da značajnije odstupanje u vrednosti je u slučaju leta Beograd–Hurgada, usled razlike u geografskim širinama ova dva mesta. Procenjene efektivne doze (E) za ove letove, koje praktično predstavljaju doze koju bi primio pojedinac pri jednom letu na datim relacijama su u opsegu (0,02–0,25) mSv, što bi u slučaju preseka od jednog povratnog leta u dve godine, rezultovalo dozama u opsegu (0,04–0,5) mSv. Najveća doza (0,25 mSv) je dobijena u slučaju leta na relaciji Beograd–Njujork, s obzirom na najduže vreme trajanja leta od 10 h. Procenjene vrednosti su ispod propisane vrednosti od 1 mSv za stanovništvo [13].

V. ZAKLJUČAK

U radu su prikazani rezultati dobijeni korišćenjem *Geant4* softverskog paketa, koji se zasniva na Monte Karlo simulacijama, čiji je cilj bila procena doza kosmičkog zračenja. Postavka u simulacijama se zasnivala na konstrukciji vodenog cilindra mase 75 kg, koji je reprezentovao ljudsko telo, dok su čestice kosmičkog zračenja (mioni, neutroni, protoni, elektroni, pozitroni, fotoni i pioni) emitovani iz kvadratne površine postavljene uz gornju površinu vodenog cilindra. Na osnovu dobijenih spektara deponovane energije, koja je rezultat interakcije kosmičkog zračenja sa vodenim cilindrom kroz elektromagnetne i hadronske procese, dobijeni su rezultati jačina apsorbovanih doza na tri različite visine: 0, 2 100 i 11 300 m, kao i na tri različite geografske širine (30° , 45° i 60°). Vrednosti jačina apsorbovanih doza su pokazala izraženu zavisnost od visine, ali slabu zavisnost od geografske širine i solarne aktivnosti. Na nivou mora, nadmorske visine 0 m, vrednost jačine apsorbovane doze je procenjena na 23 nGy h^{-1} , dok godišnja efektivna doza iznosi 0,12 mSv, što je ispod propisanog nivoa od 1 mSv za stanovništvo.

Analizirane su i vrednosti efektivnih doza koje primi kako pojedinac, u toku jednog povratnog leta u dve godine, za

nekoliko odabranih letova, sa različitim vremenskim trajanjem leta.

Na osnovu dobijenih rezultata, može se zaključiti da doza koju primi stanovništvo na nivou mora i visinama do ≈ 2 km ne predstavlja značajno povišene vrednosti jačina apsorbovanih doze, i posledično godišnje efektivne doze, kao i da prilikom kraćih letova (u trajanju do 10h) i manje učestalih letova (do dva duža povratna leta godišnje), vrednosti godišnjih efektivnih doza takođe ne prelaze propisanu vrednost od 1 mSv. S druge strane, izloženost avionskog osoblja, uzimajući učestalost letova, potencijalno prelazi ovu vrednost ako se posmatra vremenski period od godinu dana, te ukazuje na to da avionsko osoblje treba da bude svesno povećanog izlaganja kosmičkom zračenju, koje je potrebno periodično meriti i kontrolisati i u slučaju povećanih doza primeniti mere radijacione zaštite za profesionalno izložena lica [13].

REFERENCE

- [1] J. Chen, E. Timmins, K. and S. T. Verdecchia, "An estimation of Canadian population exposure to cosmic rays," *Radiation and Environmental Biophysics*, 2009, 48, pp. 317–322. doi: 10.1007/s00411-009-0226-z.
- [2] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), *Sources and Effects of Ionizing Radiation*. Volume I: Sources, ISBN 92-1-142238-8, 2000.
- [3] J. Swarup, "Photon spectra of gamma rays backscattered by infinite AIR. II. Skyshine", *Nuclear Instruments and Methods*, 1980, 172, pp. 559–566, doi.org/10.1016/0029-554X(80)90349-3.
- [4] B. Vuković, I. Lisjak, V. Radolić, B. Vekić, J. Planinić, "Measurements of the dose due to cosmic rays in aircraft," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2006, 562, pp. 517–520. doi:10.1016/j.nima.2006.01.132.
- [5] B. Vuković, M. Poje, M. Varga, V. Radolić, I. Miklavčić, D. Faj, D. Stanić, J. Planinić, "Measurements of neutron radiation aircraft," *Applied Radiation and Isotopes*, 2010, 68, pp. 2398–2402, doi:10.1016/j.apradiso.2010.06.017.
- [6] A. L. Mishev, "Contribution of cosmic ray particles to radiation environment at high mountain altitude: Comparison of Monte Carlo simulations with experimental data," *Journal of environmental Radioactivity*, 2016, 153, pp. 15–22. doi.org/10.1016/j.jenvrad.2015.12.002.
- [7] M. C. Alves, et al. "Monte Carlo calculation of the neutron dose to a fetus at commercial flight altitudes," *Radiation Physics and Chemistry*, 2017, 140, pp. 398–402. doi.org/10.1016/j.radphyschem.2017.03.041.
- [8] J. Knezevic, *Koincidentne metode za analizu vremenskih karakteristika nuklearnih procesa*, Doktorska disertacija, Prirodno-matematički fakultet, Univerzitet u Novom Sadu, Novi Sad, 2020.
- [9] S. Agostinelli, et al. "GEANT4 - A simulation toolkit," *Nuclear Instruments and Methods A*, 2003, 506, pp. 250–303, https://doi.org/10.1016/S0168-9002(03)01368-8.
- [10] C. Hagmann, et al. "Monte Carlo Simulation of Proton-induced Cosmic-ray Cascades in the Atmosphere Lawrence Livermore National Laboratory," 2012.
- [11] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, (UNSCEAR), *Sources and Effects of Ionizing Radiation*. Volume I: Sources, ISBN 978-92-1-142274-0, 2008.
- [12] G. Cinelli, et al. "European annual cosmic-ray dose: estimation of population exposure," *Journal of Maps*, 2017, 13 (2), pp. 812–821, doi.org/10.1080/17445647.2017.1384934.
- [13] Službeni glasnik RS 86/2011 i 50/2018, "Pravilnik o granicama izlaganja jonizujućim zračenjima i merenjima radi procene nivoa izlaganja jonizujućim zračenjima."