

N. Marinković, M. V. Mataušek, R. Simović, I. Zmijarević

Institut za nuklearne nauke

"Boris Kidrič" - Vinča

COUR Institut za nuklearnu

energetiku i tehničku fiziku NET

UPOREDJENJE MOGUĆNOSTI I TAČNOSTI ČELIJSKIH
PROGRAMA LEOPARD, LATREP I WIMSD/4

POSSIBILITIES AND ACCURACY OF LATTICE CELL
CODES LEOPARD, LATREP AND WIMSD/4

SADRŽAJ - Višegrupni difuzioni parametri u funkciji izgaranja nuklearnog goriva određivani su za različite konfiguracije čelije reaktorske rešetke, kao i za ostale materijalne zone reaktora, raspoloživim čelijskim programima LEOPARD, LATREP i WIMSD/4. Upoređene su karakteristike i mogućnosti ovih programa i analizirana je tačnost proračuna. Testirane su različite opcije programa WIMSD/4 a rezultati proračuna upoređeni i sa rezultatima koje daje francuski program odgovarajuće kategorije APOLLO.

ABSTRACT - Burnup dependent fewgroup parameters of different reactor lattice cells and other reactor core materials were computed by available lattice cell codes: LEOPARD, LATREP and WIMSD/4. Characteristics and possibilities of these codes were compared and the accuracy of the computations analysed. Different options of the WIMSD/4 code were tested and the results compared to those obtained by the French code of the same class, APOLLO.

1. UVOD

Proračun parametara elementarne čelije reaktorske rešetke je prvi korak u složenoj računarskoj šemi za projektovanje reaktorskog jezgra, analizu izgaranja nuklearnog goriva i rukovanje gorivom u reaktorskom delu nuklearnog gorivnog ciklusa. Pri tome je tačnost proračuna višegrupnih difuzionih parametara, koji služe kao ulazni podaci za globalne proračune reaktorskog jezgra, od presudnog značaja za dalje faze proračuna. Otuda stalna potreba za razvojem, usavršavanjem i proverom računarskih programa, koji poseduju što bolje biblioteke osnovnih podataka za što veći broj nuklida i koji se sa pouzdanošću mogu koristiti za formiranje biblioteka višegrupnih difuzionih parametara reaktora.

Svi algoritmi za proračun parametara reaktorske čelije uključuju rešavanje jednačine transporta neutrona u multigrupnoj aproksimaciji. NET IBK biblioteka^{1/1} sadrži veći broj testiranih programa za proračun parametara reaktorskih čelija različitih tipova. Većina ovih programa, međutim, može se koristiti sa za pojedine

faze proračuna: pripremu multigrupnih preseka u termalnoj ili rezonantnoj oblasti, proračun prostorno-energetske raspodele neutronskega fluksa u cilindrizovanoj ćeliji, proračun termalizacije neutrona ili proračun promene izotopskog sastava goriva u zavisnosti od izgaranja. Samo manji broj programa, instalisanih u poslednje vreme, obuhvata sve faze proračuna i poseduje sopstvene biblioteke osnovnih podataka. To su programi LEOPARD^{2/}, LATREP^{3/} i WIMSD/4^{4/}.

Sa ciljem da se utvrdi pouzdanost rezultata koje daju navedeni programi, oni su u ovom radu korišćeni za određivanje dvogrupnih difuzionih parametara u funkciji izgaranja nuklearnog goriva za različite konfiguracije ćelije reaktorske rešetke, kao i za ostale materijalne zone reaktora. Uporedjene su karakteristike i mogućnosti ovih programa i analizirana je njihova tačnost. Takođe su testirane različite opcije programa WIMSD/4, a rezultati su upoređeni i sa raspoloživim rezultatima koje daje francuski program odgovarajuće kategorije, APOLLO.

2. KARAKTERISTIKE I MOGUĆNOSTI RASPOLOŽIVIH ĆELIJSKIH PROGRAMA

Kod izbora ćelijskih programa osnovne karakteristike od interesa su: prikaz geometrije reaktorske ćelije (broj i raspored materijalnih zona), prikaz energetske zavisnosti efikasnih preseka i neutronskega fluksa (broj i raspored energetskih grupa), obimnost biblioteke osnovnih podataka (broj nuklida koje obuhvata) i mogućnost tretiranja temperaturske zavisnosti ćelijskih parametara (broj temperaturnih tačaka u biblioteci osnovnih podataka). Na tačnost proračuna takođe utiču: primenjeni fizički model za određivanje matrice rasejanja neutrona, primenjeni postupak rešavanja sistema multigrupnih jednačina transporta neutrona u termalnoj i epitermalnoj energetske oblasti, izbor lanaca u diferencijalnim jednačinama za proračun izotopskog sastava goriva u funkciji izgaranja.

U Tabeli 1. osnovne karakteristike programa LATREP, LEOPARD i WIMSD/4 upoređene su sa karakteristikama ranije korišćenih programa CRISPV-DELFIN^{5/} i karakteristikama francuskog programa opšte namene APOLLO^{6/}. Dok su ranije korišćeni programi CRISPV-DELFIN, od kojih prvi račun srednje vrednosti neutronskega fluksa u zonama ćelije tipa gorivo-košuljica-moderator a drugi određuje promenu izotopskog sastava goriva u funkciji izgaranja, zahtevali ručnu intervenciju u cilju prenošenja medjurezultata, kod programa LATREP, LEOPARD i WIMSD/4 ova je veza automatizovana. Program LATREP namenjen je isključivo za proračun ćelija teškovodnih reaktora i kao izlaz daje jednogrupne difuzione parametre. Za tretiranje prostorne zavisnosti neutronskega fluksa koristi metod verovatnoće sudara, pri čemu gorivni element može biti u obliku štapa, cevi ili snopa. Program LEOPARD, međutim može da tretira samo četvorozonu ćeliju sa gorivom u obliku štapa, ima nešto potpuniju biblioteku osnovnih multigrupnih podataka, namenjen je prvenstveno za proračune parametara ćelije lakovodnih reaktora, a kao izlaz daje difuzione parametre u dve ili četiri grupe.

Tabela 1. Mogućnosti NET IBK biblioteke računarskih programa za proračun nuklearno-fizičkih parametara ćelije reaktorske rešetke u funkciji izgaranja nuklearnog goriva.

Ime programa	Računar	Geometrija ćelije reaktorske rešetke	Metod transportnog proračuna	Osnovne karakteristike biblioteke podataka	Broj grupa za rezultate
CRISPV-DELFIN	CDC-3600	Cilindrična geometrija 3 - zona ćelija gorivo-štap	ABH metod; P_1 ili B_1 aproksimacija	21 nuklid 40 grupa temp. zavisnost pre- seka za moderator	2 ili 4
LEOPARD	CDC-3600	Cilindrična geometrija; 4 - zona ćelija gorivo-štap	SOFOCATE, MUFT- Fourier tranfor- macija spektra; B_1 aproksimacija	35 nuklida 54 grupe temp. zavisnost preseka za gorivo i moderator	2 ili 4
LATREP	CDC-3600	Cilindrična geometrija; multizona ćelija, gorivo-štap, cev, snop	Metod verovatnoće sudara	28 nuklida	1 ili 2
WIMSD/4	IBM3031	Homogena, ravna, sferna; cilindrična geometrija; multizona ćelija, gorivo-štap, cev, snop	Metod diskretnih ordinata ili vero- vatnoće sudara; difuziona ili B_1 aproksimacija	100 nuklida 69 grupa temp. zavisnost preseka za gorivo i moderator	2 ili po izboru
APOLLO	IBM 3033	Ravna, cilindrična, sferna geometrija; multizona ćelija gorivo-štap, cev, snop	Metod verovatnoće sudara; difuziona ili B_1 aproksimacija	više od 100 nuklida 99 grupa temp. zavisnost preseka za veći broj nuklida	2 ili 4

Program WIMSD/4 ima daleko šire mogućnosti od programa LATREP i LEOPARD, ali se može instalirati samo na velikim računarima. Veoma obimna biblioteka osnovnih podataka sa ukupno 69 grupa, od čega je veći deo u brznoj i rezonantnoj oblasti odgovara i za termalne i za brze reaktore. Program može da tretira različite konfiguracije reaktorske ćelije: homogenu ćeliju, ploču ili svežanj ploča, cilindrizovanu multizonu ćeliju beskonačne ili konačne visine i ćeliju sa gorivnim elementom u vidu snopa šipki. U cilju ekonomičnog korišćenja mašinskog vremena, ćelijski proračun spektra vrši se u dva koraka: preliminarni proračun spektra (nekoliko prostornih oblasti, mnogo energetske grupe) vrši se metodom verovatnoća sudara, dok se glavni transportni proračun (mnogo prostornih zona, nekoliko sažetih grupa) može vršiti ili metodom verovatnoća sudara ili metodom diskretnih ordinata. Isticanje se može tretirati ili B₁ metodom ili difuzionim postupkom. Rezultujuća prostorno-energetska raspodela se tada ekstrapolira korišćenjem prvih rezultata, tako da se iznosi reakcija datog tipa mogu odrediti za svaku prostornu tačku i sa energetske strukturom koju ima biblioteka osnovnih podataka. Pored ćelijskog proračuna WIMSD/4 vrši proračun promene izotopskog sastava goriva sa izgaranjem, te izračunava višegrupne parametre ćelije reaktorske rešetke u funkciji izgaranja i za zadate vrednosti temperature materijala.

WIMSD/4 je praktično jedini program ovako širokih mogućnosti koji se može dobiti na osnovu međunarodne saradnje. Programi odgovarajuće kategorije po pravilu su vlasništvo institucije koje su ih razvile i nisu opšte dostupni. Takav je slučaj i sa francuskim programom APOLLO, čije su karakteristike takodje navedene u Tabeli 1. U poredjenju sa programom WIMSD/4, program APOLLO ima još obimniju biblioteku osnovnih nuklearnih podataka zasnovanu na ENDF/B nuklearnim podacima, a može da tretira i komplikovanije geometrije (kaseta LWP) primenom tzv. multićelijskog postupka.

3. UPOREDJENJE REZULTATA PROGRAMA LEOPARD, LATREP I WIMSD/4

Za uporedjenje programa LEOPARD i WIMSD/4 izabrane su elementarne ćelije reaktorske rešetke NE Krško^{17/}, obogaćenja 2.1%, 2.6% i 3.1%. Rezultati proračuna reaktivnosti ovih ćelija u zavisnosti od izgaranja pokazani su na Sl.1. Razlike su manje za slučaj manjeg obogaćenja i smanjuju se sa izgaranjem u sva tri slučaja, a verovatno u najvećoj meri potiču od razlika u osnovnim podacima.

Uporedjenje programa LATREP sa ostalim programima otežava činjenica da se njegov izlaz u velikoj meri razlikuje od izlaza ostalih programa (jednogrupske konstante). Program je korišćen za proračun ćelije reaktora RA obogaćenja 80%^{18/} i dobijena vrednost za reaktivnost pri nultom izgaranju $k_{\infty} = 1,820211$ ^{13/} pokazala je u poredjenju sa vrednošću koju daje APOLLO ($k_{\infty} = 1,815475$) relativno

dobro slaganje. Vrednosti materijalnog baklinga za isti slučaj pokazuju razliku od približno 5%.

Rezultati proračuna parametara elementarne ćelije reaktora RA sa 80% obo-
gaćenim disperzionim gorivom ^{18/} iskorišćeni su za verifikaciju programa WIMSD/4.
U Tabeli 2. prikazani su dvogrupni difuzioni parametri pri nultom izgaranju u
poredjenju sa parametrima dobijenim programom APOLLO^{6/}. Može se smatrati da je
slaganje rezultata dobro, a da razlike nastaju pre svega zbog različitih bibli-
oteka osnovnih podataka ali i zbog različitog broja energetskih grupa korišćenih
u proračunima. Takodje se može zaključiti da izbor programa WIMSD/4 za ćelijske
proračune ima opravdanja ne samo sa aspekta široke fleksibilnosti i oblasti pri-
menljivosti, već i na osnovu slaganja sa programom iste klase pouzdanosti, koji
je verifikovan na realnim proračunima potrebnim za energetske nuklearne reaktore
ali nažalost nije raspoloživ.

4. TESTIRANJE RAZLIČITIH OPCIIJA PROGRAMA WIMSD/4

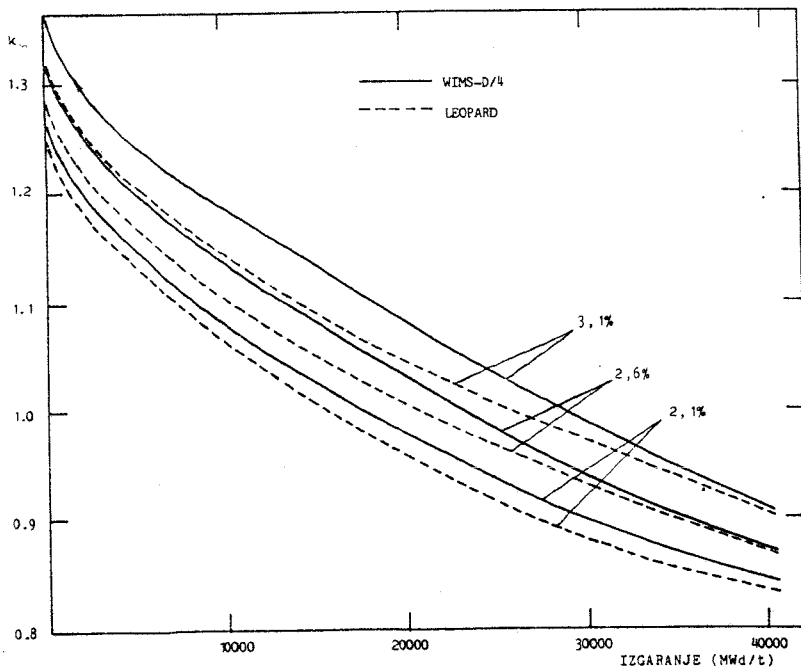
Program WIMSD/4 je složena računarska šema koja poseduje niz opcija u pri-
kazu fizičkog problema koji se tretira i u izboru metoda proračuna te, zavisno
od namene, omogućava dobijanje rezultata različitog stepena tačnosti. Za pouzdano
korišćenje programa neophodno je ne samo detaljno poznavanje njegovih mogućnosti
već i poznavanje uticaja izbora ulaznih parametara na rezultate proračuna u poje-
nim specifičnim slučajevima.

Za testiranje različitih opcija u vezi sa multigrupnim transportnim pro-
računom prostorno-energetske raspodele neutronskog fliksa u ćeliji reaktora izab-
rana je ćelija reaktora RB sa gorivom od prirodnog metalnog uranijuma ^{18/} (deblji-
na gorivnog štapa 1,25 cm, efektivni radijus ćelije 7,335 cm). Iz Tabele 3. se
može videti uticaj izbora metode rešavanja transportne jednačine u tzv. glavnom
transportnom proračunu. Metod verovatnoće sudara (PERSEUS) zahteva upola manje
računarskog vremena od S_4 aproksimacije metode diskretnih ordinata (DSN), a raz-
lika u reaktivnosti iznosi 110 pcm. Razlike vrednosti dvogrupnih konstanti naj-
veće su u slučaju apsorpcije i fisije u termalnoj oblasti, ali ne prelaze 3,5%.
Na istom primeru testiran je uticaj broja energetskih grupa kod glavnog trans-
portnog proračuna. Rezultati su prikazani u Tabeli 4. Može se zaključiti da je
proračun sa 20 energetskih grupa prihvatljiv kako sa aspekta tačnosti tako i sa
aspekta uštede u vremenu računanja. Uporedjenje sa reaktivnošću računatom sa 69
energetskih grupa pokazuje da razlika iznosi 58 pcm.

Broj prostornih tačaka u glavnom transportnom proračunu zadaje se kao
ulazni podatak. Analiza uticaja izabranog broja tačaka mreže u gorivu i modera-
toru na proračun parametara reaktorske ćelije izvršen je takodje na primeru tro-
zone ćelije reaktora RB, i rezultati su pokazani u Tabeli 5.

Tabela 2. Rezultati proračuna parametara elementarne ćelije reaktora RA obogaćenja 80% različitim programima.

Program		APOLLO	WIMS-D/4
Grupa			
1	D	1,31860	1,37737
2		0,83916	0,83913
1	ϵ_a	$4,20310E-4$	$3,85320E-4$
2		$5,78400E-3$	$5,79560E-3$
1	ϵ_r	$9,86700E-3$	$1,08510E-2$
2		-	$5,62940E-5$
1	$\nu\epsilon_f$	$5,22560E-4$	$5,38450E-4$
2		$1,06970E-2$	$1,10380E-2$
k_{∞}		1,8908209	1,887006
Br. grupa		99	69



Sl. 1. Rezultati proračuna reaktivnosti elementarnih ćelija NE Krško.

Tabela 3. Zavisnost parametara ćelije sa metalnim prirodnim gorivom od izabrane metode programa WIMS-D/4.

Metod		DSN	PERSEUS
Grupa			
1	D	1,297918	1,298135
2		0,857987	0,858643
1	E _a	1,423251E-3	1,423269E-3
2		4,940815E-3	5,113412E-3
1	E _r	9,853285E-3	9,862777E-3
2		4,900110E-5	5,073717E-5
1	vE _g	9,967561E-4	9,958146E-4
2		6,104484E-3	6,320919E-3
k _{eff}		1,166761	1,167869
Br. grupa u proračunu		69	69
Br. tačaka u gorivu		5	5
Br. tačaka u moderatoru		7	7
Vreme proračuna CPU (s)		83,607	43,793

Tabela 4. Zavisnost parametara ćelije sa metalnim prirodnim gorivom od izbora broja energetske grupa u proračunima programa WIMS-D/4.

Metod		PERSEUS		
Grupa				
1	D	1,298135	1,311104	1,311104
2		0,858643	0,804120	0,871911
1	E _a	1,423269E-3	1,435861E-3	1,480294E-3
2		5,113412E-3	5,062005E-3	4,989032E-3
1	E _r	9,862777E-3	1,013654E-2	1,067097E-2
2		5,073717E-5	2,117950E-5	4,474103E-6
1	vE _g	9,958146E-4	9,440700E-4	1,008453E-3
2		6,320919E-3	6,252311E-3	6,150406E-3
k _{eff}		1,167869	1,167286	1,165447
Br. grupa u proračunu		69	20	3
Br. tačaka u gorivu		5	5	5
Br. tačaka u moderatoru		7	7	7
Vreme proračuna CPU (s)		43,793	14,416	9,416

Tabela 5. Zavisnost parametara ćelije sa prirodnim metalnim gorivom od izbora broja tačaka mreže u gorivu i moderatoru pri proračunima programom WIMS-D/4.

Broj tačaka u gorivu		1	5	10	5	5	5
Broj tačaka u moderatoru		7	7	7	3	7	15
Grupa							
1	D	1,326876	1,327467	1,327345	1,327931	1,327467	1,327248
2		0,874218	0,873910	0,873819	0,874565	0,873910	0,873559
1	E _a	1,491253E-3	1,480295E-3	1,481886E-3	1,470607E-3	1,480295E-3	1,484889E-3
2		5,065899E-3	4,989032E-3	4,966136E-3	5,129497E-3	4,989032E-3	4,914098E-3
1	E _r	1,066790E-2	1,067196E-2	1,067186E-2	1,068010E-2	1,067196E-2	1,066804E-2
2		4,544950E-6	4,474103E-6	4,452886E-6	4,502040E-6	4,474103E-6	4,406798E-6
1	vE _g	1,017579E-3	1,008453E-3	1,013634E-3	1,004049E-3	1,008453E-3	1,010718E-3
2		6,253365E-3	6,150406E-3	6,119959E-3	6,327696E-3	6,150406E-3	6,057384E-3
k _{eff}		1,166645	1,165547	1,165428	1,166866	1,165547	1,164967
Vreme proračuna CPU (s)		8,784	9,903	11,853	7,920	9,903	13,145

Tabela 6. Zavisnost parametara nefisibilnih materijala reaktorskog jezgra od izbora geometrije u proračunima programom WIMS-D/4.

Materijal		Moderator		Grafit		Aluminijum	
		Ravna	Cilindrična	Ravna	Cilindrična	Ravna	Cilindrična
Grupa							
1	D	1,399956	1,399956	1,081253	1,081253	3,316154	3,316154
2		0,842412	0,842412	0,835566	0,835566	3,458368	3,458368
1	E _a	5,320142E-6	5,320142E-6	7,596634E-6	7,596633E-6	7,967902E-4	7,967902E-4
2		1,274138E-4	1,274139E-4	2,485598E-4	2,485598E-4	1,346079E-2	1,346079E-2
1	E _r	1,091660E-2	1,091661E-2	3,913581E-3	3,913581E-3	2,468358E-5	2,468358E-5
2		1,212011E-6	1,212011E-6	9,131456E-6	9,131464E-6	1,046113E-3	1,046113E-3
Vreme proračuna CPU (s)		99,333	36,233	74,090	68,234	76,090	56,540

Kao ćelijski program, WIMSD/4 zahteva da bar jedan od nuklida koji ulaze u sastav posmatrane ćelije bude fisibilan. I pored toga, međutim, WIMSD/4 se može primeniti za određivanje grupnih difuzionih parametara homogenih ili heterogenih zona reaktora različite konfiguracije i sastava (eksperimentalni prostor, reflektori, kontrolne zone i sl.). U tom slučaju bira se geometrija "ćelije" koja najbolje odgovara realnoj konfiguraciji posmatrane zone, a kod specifikacije materijalnog sastava unosi se i fiktivni podatak u vidu izuzetno niske koncentracije nekog fisibilnog nuklida. Očigledno da je u ovakvim slučajevima specifikacija ulaznih podataka u velikoj meri proizvoljna, te je od interesa ispitati kako izbor pojedinih opcija utiče na rezultate proračuna. U tom cilju dvogrupni difuzioni parametri homogenih materijala ($D_2O-0,5\%H_2O$, Al, C) određeni su na dva načina - u ravnoj i cilindričnoj geometriji. Upoređenje ovih rezultata prikazanih u Tabeli 6. pokazuje dobro slaganje i nameće zaključak da je povoljnije koristiti cilindričnu geometriju zbog kraćeg vremena računanja.

5. ZAKLJUČAK

Na osnovu prethodno navedenih rezultata proračuna elementarnih ćelija i njihovog uporedjenja može se zaključiti opravdanost korišćenja programa WIMSD/4, jer je postignuto slaganje sa rezultatima programa iste klase (moguće je i savršenijeg obzira da je noviji) APOLLO. Odstupanja prilikom poredjenja sa programom LEOPARD potrebno bi bilo testirati na još nekom primeru a najverovatnije je da potiču od razlika u bibliotekama efikasnih preseka.

6. LITERATURA

- 1/ M.V.Mataušek et.al. NET IBK paket računarskih programa za potrebe planiranja, gradnje i eksploatacije nuklearnih elektrana, Zbornik radova Konferencije o korišćenju nuklearnih reaktora u Jugoslaviji, Beograd, 1978.
- 2/ N.Marinković, A.Kocić, Program LEOPARD, opis i uputstvo za korišćenje, IBK-1556, 1982.
- 3/ N.Dašić, A.Kocić, Proračun parametara ćelija reaktora RB u funkciji izgaranja, Zbornik radova XXVI Konf. ETAN-a, IV sveska, 1982.
- 4/ J.R.Askew, A General Description of Lattice Code WIMS, J.B.N.E.S. 564, 1968.
- 5/ N.Marinković, CRISPV, Opis u uputstvo za korišćenje programa, IBK-1387, 1976.
N.Marinković, DELFIN-Program za proračun promene izotopskog sastava nuklearnog goriva, IBK-1414, 1977.
- 6/ A.Hoffman et.al., APOLLO, Code multigruppe de resolution de l'equation du transport pour les neutrons thermiques et rapides, Note-CEA-N-1690, 1973.
- 7/ Final Safety Analysis Report for NPP Krško, Section 4, Westinghouse 1979.
- 8/ M.Pešić, O.Šotić, Nuklearni podaci za materijale reaktora RB, IBK-1430, 1977.