

مدیریت سوخت راکتورهای هسته ای PWR با استفاده از شبکه های عصبی

سعید ستایشی
استادیار
دانشکده فیزیک و علوم هسته ای، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

مصطفی صدیقی
دانشجوی دکتری
دانشکده فیزیک و علوم هسته ای، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

علی اکبر صالحی
استاد
آژانس بین المللی انرژی اتمی، نمایندگی ایران

چکیده

در این مقاله روش جدیدی برای یافتن بهترین آرایش مجتمع های سوخت در قلب یک راکتور PWR (راکتور آبی تحت فشار) ارائه شده است. در روشهای کلاسیک پیدا کردن آرایش بهینه مستلزم انجام محاسبات طولانی می باشد. در این جا نشان داده شده است که کاربرد شبکه عصبی پیوسته هوفیلد به همراه روش سرد کردن تدریجی (Simulated Annealing)، نه تنها از حجم محاسبات می کاهد بلکه رسیدن به بهترین جواب را نیز تضمین می نماید.

کلمات کلیدی

مدیریت سوخت، راکتورهای هسته ای، شبکه های عصبی.

PWR Fuel Management Optimization Using Neural Networks

M. Sadighi
Ph. D Student
Faculty of Physics and Nuclear Sciences,
Amirkabir University of Technology

S. Setayeshi
Assistant Professor
Faculty of Physics and Nuclear Sciences,
Amirkabir University of Technology

A. Salehi
Professor
The Ambassador, Representative of the I.R. of Iran
to International Atomic Energy Agency, Vienna

Abstract

This paper presents a new method to solve the problem of finding the best configuration of fuel assemblies in a PWR (Pressurized Water Reactor) core. Finding the optimum solution requires a huge amount of calculations in classical methods. It has been shown that the application of continuous Hopfield neural network accompanied by Simulated Annealing method to this problem not only reduces the amount of calculations, but also guarantees finding the best solution. In this study flattening of neutron flux inside the reactor core of Bushehr NPP is considered as the objective function. The result is the optimum configuration which is in agreement with the pattern proposed by the designer.

Keywords

Fuel Management, Optimization, Neural Networks.

مدیریت سوخت شاخه ای از مهندسی هسته‌ای است که در آن آرایش سوخت درون راکتور برای سیکل اول و سیکل‌های بعدی به منظور تولید انرژی با لحاظ نمودن مسائل ایمنی به دست می‌آید [۱].

با در نظر گرفتن اینکه قلب راکتور PWR در برگزیده مجتمعی از ۱۹۳ عنصر سوختی می‌باشد، تعداد حالات ممکن برای جایگذاری سوخت درون قلب ۱۹۳! است. چنانچه تقارن یک هشتم را برای قلب در نظر بگیریم، کافی است که محل ۳۱ سوخت مشخص گردد که در این حالت ۳۱! یعنی در حدود 10^{32} چینش را برای این منظور می‌توان ارائه نمود، که نشان‌دهنده حجم بسیار زیاد محاسبات جهت یافتن بهترین جواب می‌باشد [۲].

در این مقاله استفاده از یک شبکه عصبی پیوسته هوفیلد به همراه روش سرد کردن تدریجی (Simulated Annealing) برای مدیریت سوخت نیروگاه اتمی بوشهر پیشنهاد گردیده است.

در مقایسه با روشهای کلاسیک [۳]، روش بکار گرفته شده هم ساده‌تر است و هم جوابهای بدست آمده به جواب بهینه نزدیکتر می‌باشد.

۱- مدیریت سوخت راکتور هسته ای PWR

در راکتورهای PWR یافتن بهترین طرح سوخت‌گذاری هم از جهت ایمنی و هم به لحاظ اقتصادی حائز اهمیت بسزائی می‌باشد. در حدود یک سوم از سوختهای راکتور در پایان یک سیکل (حدود یک سال) از راکتور خارج گشته و سوختهای نو وارد قلب راکتور می‌گردند.

سوختهای باقیمانده از سیکل قبل و سوختهای جدید به گونه‌ای می‌بایست درون قلب جای‌گذاری گردند که طرح انتخاب شده برای سوخت‌گذاری اولاً محدودیتهای ایمنی از قبیل ماکزیمم قدرت نسبی تولید شده توسط سوختها (P_{max}) و حداکثر میزان سوختن مجاز برای هر سوخت (BU_{max}) را تامین نموده و ثانیاً ماکزیمم انرژی را در طول سیکل ایجاد نماید [۴].

روشهای گوناگونی برای مدیریت سوخت راکتورهای هسته‌ای پیشنهاد گردیده است که بعضی از آنها عبارتند از:

- برنامه‌ریزی خطی (Linear Programming)

- برنامه‌ریزی پویا (Dynamic Programming)

- تئوری اغتشاش (Perturbation Theory)

- روش هوش مصنوعی (Artificial Intelligence) [۵] هیچ یک از روشهای فوق رسیدن به جواب بهینه را تضمین نکرده بلکه به علت محدودیتهای موجود در الگوریتمهای جستجو فقط جوابهای بدست آمده قدری نزدیک به

جواب بهینه می‌باشد [۴].

روش پیشنهادی در این مقاله استفاده از شبکه‌ای عصبی با ساختار موازی شبیه شبکه هوفیلد می‌باشد که توانایی زیادی در حل مسایل بهینه سازی دارد [۶] و [۷].

۲- شبکه عصبی هوفیلد

اصولاً شبکه هوفیلد بر دو نوع می‌باشد: شبکه پیوسته و شبکه ناپیوسته. در شبکه پیوسته مقادیر خروجی نوروها بین صفر و یک تغییر می‌نماید و دینامیک شبکه توسط یک سری معادلات دیفرانسیل غیر خطی تعیین می‌گردد.

در شبکه ناپیوسته خروجی نوروها تنها یکی از دو مقدار صفر یا یک بوده و دینامیک شبکه توسط یک سری معادلات غیرخطی تفاضلی (non linear difference equations) بیان می‌گردد [۶] و [۷].

یکی از خواص مهم شبکه هوفیلد این است که با شروع از هر حالت اولیه نهایتاً شبکه به سمت یک حالت پایدار (مینیمم محلی) هدایت می‌گردد [۸].

از میان دو مدل شبکه هوفیلد مدل پیوسته برتریهای بیشتری نسبت به مدل ناپیوسته دارد این بیشتر به خاطر آن است که بواسطه تابع انرژی مناسبتر از پایداری بیشتری برخوردار است [۸].

از سال ۱۹۸۵ که مدل پیوسته هوفیلد برای حل مساله TSP (Travelling Salesman Problem) بکار گرفته شده است کاربردهای فراوانی در حل مسایل بهینه‌سازی پیدا کرده است [۹].

همانطور که ذکر شد شبکه هوفیلد به سمت یک مینیمم محلی همگرا می‌گردد. بنابراین در هر بار اجرا و بکارگیری، این شبکه ممکن است به حالت پایداری برسد که نسبت به حالت قبل از انرژی پایینتری برخوردار است که این خود مشکلی برای مسایل بهینه‌سازی به حساب می‌آید. برای حل این مشکل از متدهای فرار از مینیمم محلی می‌توان کمک گرفت که در این بررسی از روش سرد نمودن تدریجی (SA) استفاده شده است [۱۰] و [۱۱].

۳- روش سرد کردن تدریجی

SA (Simulated Annealing)

انرژی مواد در درجه حرارت بالا بیشتر از انرژی آنها در درجه حرارت پایین می‌باشد. بنابراین با سرد کردن تدریجی ماده انرژی آن به سمت انرژیهای پایینتر سوق پیدا می‌کند و ماده حالت پایدارتری به خود می‌گیرد. این کاهش دما (انرژی) می‌بایست بصورت تدریجی باشد. در غیر اینصورت

ماده حالت شکننده به خود گرفته و ساختار کریستالی مورد نظر بدست نخواهد آمد [۱۲].

در روش SA فرایند از یک دمای اولیه (T) شروع شده و سپس به تدریج کاهش می‌یابد. در هر درجه حرارت، سیستم به اندازه کافی تحول انجام داده سپس به درجه حرارت پایینتر هدایت می‌گردد. به این ترتیب درجه حرارت آنقدر کاهش می‌یابد که سیستم به حالت پایدار برسد. در حالت پایدار هیچگونه تغییر حالتی که باعث کاهش انرژی سیستم گردد وجود نخواهد داشت. در هر تغییر حالت مقدار تغییر انرژی (ΔE) محاسبه می‌شود. چگونگی این تغییرات می‌تواند از شرایط ذیل تبعیت نماید:

الف - $\Delta E < 0$: در این صورت تغییر حالت قابل قبول می‌باشد.
ب - $\Delta E > 0$: در این صورت تغییر حالت ممکن است قابل قبول بوده و یا رد گردد.
برای بررسی این موضوع ابتدا تابع احتمالاتی زیر محاسبه می‌شود

$$P(\Delta E) = \exp(-\Delta E / KT) \quad (1)$$

در رابطه (۱)، K ثابت بولتزمن و T درجه حرارت است. مقدار $P(\Delta E)$ با یک عدد تصادفی (RANDOM) که بین صفر و یک است و توسط کامپیوتر تولید می‌گردد مقایسه می‌شود. اگر $P(\Delta E) < \text{RANDOM}$ بود تغییر حالت قابل قبول بوده در غیر اینصورت رد می‌گردد. هر قدر که درجه حرارت کوچکتر شود احتمال قبول تغییر حالتی با $\Delta E > 0$ کمتر شده و نهایتاً شبکه به سمت مینیمم واقعی (Global Minima) همگرا می‌گردد [۱۰] و [۱۱]

۸- کاربرد شبکه هوفیلد در مساله مدیریت سوخت

یکی از توابع هدف در بهینه سازی مدیریت سوخت راکتورهای PWR مسطح ساختن شار نوترون درون راکتور می‌باشد. این بدان معنی است که چینش سوختها می‌بایست طوری درون راکتور انتخاب گردد که تا حد ممکن شار یکنواخت‌تری ایجاد گردد [۵].

در تشابه با مساله TSP واضح است که هر سوخت می‌بایست به یک محل اختصاص یابد و هر محل نیز تنها با یک سوخت پر گردد. بنابراین محدودیتهای اول و دوم در این حالت شبیه TSP می‌باشد ولی تابع هدف در این جا به سادگی مساله TSP نمی‌باشد.

در مساله مدیریت سوخت که مسطح بودن شار نوترونی به عنوان هدف انتخاب شده است می‌بایست در هر تغییر

حالت نوروونها شار درون راکتور با استفاده از یک کد محاسباتی نوترونیک مثل EXTERMINATOR به دست آید [۱۳].

از آنجایی که در فایل ورودی این کد نیاز به مشخصات نوترونیک سوختها می‌باشد لذا این مشخصات قبلاً توسط کد محاسبات سلولی دیگری مثل WIMS D-4 تهیه می‌شود [۱۴]. این کد، مشخصاتی را که تابعی است از میزان مصرف سوختها، محاسبه نموده و در فایلهای جداگانه ذخیره می‌نماید.

یک ماتریس $N \times N = N^2$ که نمایشگر وضعیت نوروونها در هر لحظه می‌باشد در نظر گرفته، سطرهای این ماتریس نشان‌دهنده محل‌های قرار گرفتن سوختها درون قلب، و ستونها نشان‌دهنده سوختهای مختلف می‌باشد. برای تقارن یک هشتم قلب ابعاد ماتریس 31×31 است.

V_{ij} که خروجی نوروون سطر i و ستون j می‌باشد از نظر فیزیکی وزن (احتمال) قرار گرفتن سوخت زدر محل i را مشخص می‌نماید.

تابع انرژی در مساله بهینه سازی مدیریت سوخت (شبیه TSP) شامل ۴ مولفه به شرح ذیل می‌باشد [۹]:

$$E = E_1 + E_2 + E_3 + E_4 \quad (2)$$

$$E = A / 2 \{ \sum_x (\sum_i V_{xi} - 1)^2 \} \quad (3)$$

$$E_2 = A / 2 \{ \sum_i (\sum_x V_{xi} - 1)^2 \} \quad (4)$$

$$E_3 = A \sum_x \sum_i (1 - V_{xi}) \quad (5)$$

$$E_4 = D / 2 \{ \sum_x \sum_y [\sum_{i=1}^N (\Phi_x - \Phi_y)^2] \} \quad (6)$$

که در معادله (۶) سوختهای x و y دو سوخت مجاور می‌باشند. همچنین در معادلات فوق A و D ثابت‌هایی هستند که از طریق سعی و خطا بدست می‌آیند.

با انتخاب تابع انرژی ذکر شده چنانچه دینامیک حاکم بر تحولات نوروونها مطابق رابطه (۷) باشد می‌توان ثابت نمود که شبکه همگرا خواهد شد:

$$dU_{xi} / dt = -\partial E / \partial V_{xi} \quad (7)$$

با استفاده از معادلات (۲) تا (۶) خواهیم داشت:

$$dU_{xi} / dt = -A (\sum_{j \neq i} V_{xj} + \sum_{y \neq x} V_{yi}) + A - \partial E_4 / \partial V_{xi} \quad (8)$$

و وضعیت جدید خروجی نوروونها عبارت است از:

هوفیلد می‌باشد [۱۵].

حال چنانچه جواب هوفیلد به کمک متد SA بهبود یابد نتایج نشان داده شده در شکل‌های (۵) و (۶) بدست می‌آید. شکل (۵) شروع متد SA و شکل (۶) مرحله همگرا شدن این متد را نشان می‌دهند. انرژی شبکه در شکل (۶) به مقدار ۰/۱۰۷۸ رسیده است که بهتر از جوابهای طراح و شبکه هوفیلد است.

با محاسبه ماکزیمم قدرت نسبی تولید شده توسط سوختها (P_{max}) برای سه جواب فوق جدول زیر بدست می‌آید:

جدول (۱) مقادیر انرژی و P_{max} برای ۳ طرح سوخت گذاری قلب راکتور.

No	Method	Energy	Pmax
۱	Hopfield	۰/۱۴۰۲	۱/۲۸۵
۲	KWU	۰/۱۱۱۸	۱/۲۲۸
۳	Hopfield + SA	۰/۱۰۷۸	۱/۲۲۳

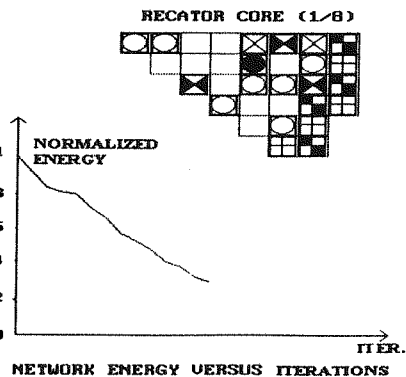
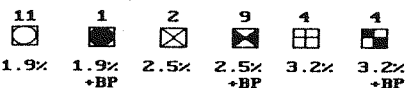
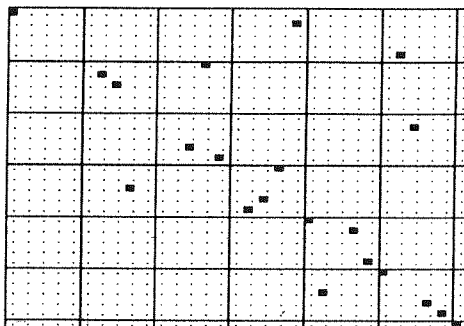
همانطور که مشاهده می‌شود جواب مرحله سوم که از کاربرد شبکه هوفیلد با متد SA بدست آمده بهترین جواب می‌باشد. در ضمن این جواب به طرح ارائه شده از سوی طراح نیروگاه نیز بسیار نزدیک است. روش ارائه شده در این مقاله برای سیکلهای بعدی نیروگاه نیز قابل استفاده می‌باشد که در صورت راه اندازی آن بنحو موثر قابل بهره‌برداری خواهد بود.

ITER= 1 FUEL CYCLE= 1

55 th STATE OF 484

INITIAL ENRICHMENTS: 1.9% 1.9% 2.5% 2.5% 3.2% 3.2%
+BP +BP +BP +BP

HOPFIELD NETWORK (OUTPUT OF NEURONS)



شکل (۱) شبکه هوفیلد تحول ۱-

$$U_{xi}(new) = U_{xi}(old) + \Delta U_{xi} \quad (9)$$

رابطه میان ورودی و خروجی نوروونها بصورت تابع سیگموید در نظر گرفته می‌شود:

$$V_{xi} = f(U_{xi}) = 1/[1 + \exp(-\alpha U_{xi})] \quad (10)$$

در معادله (۱۰)، α ثابتی است که شکل تابع سیگموید را مشخص می‌سازد.

در معادله (۸) جملات اول و دوم با استفاده از خروجی نوروونها محاسبه شده و جمله آخر به کمک تعریف مشتق قابل محاسبه می‌باشد.

شبکه هوفیلد در نظر گرفته شده برای این مساله وقتی همگرا می‌گردد که سه جمله E_1 و E_2 و E_3 همگی صفر گردند. انرژی جمله چهارم همان انرژی نقطه مینیمم محلی است که شبکه در آنجا به تعادل رسیده است. هر قدر E_4 کوچکتر باشد طرح بدست آمده برای جایگذاری سوختها طرح مناسبتری می‌باشد.

۵- بررسی نتایج

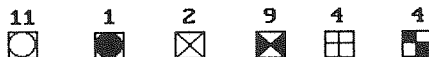
نتایج بدست آمده از یک نمونه اجرای برنامه تهیه شده در این مطالعه در شکل‌های (۱) تا (۳) نشان داده شده است. در این شکلها مراحل تحول شبکه هوفیلد از ابتدا تا مرحله همگرا شدن را می‌توان مشاهده نمود. در این مثال انرژی شبکه در حالت نهایی معادل ۰/۱۴۰۲ می‌باشد.

شکل (۴) طرح ارائه شده از سوی طراح را نشان می‌دهد که با محاسبه انرژی آن در شبکه هوفیلد مقدار انرژی، معادل ۰/۱۱۱۸ بدست آمده که بهتر از جواب

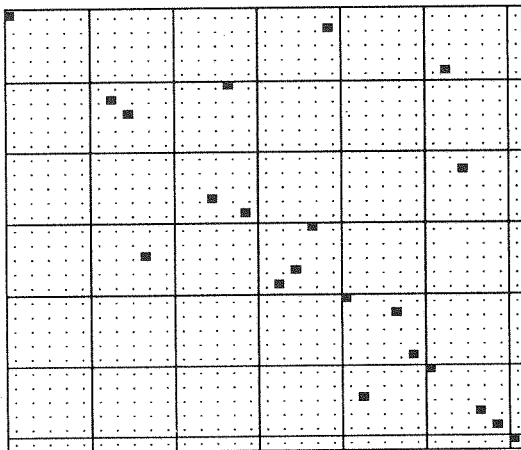
ITER= 1 FUEL CYCLE= 1

55 th STATE OF 484

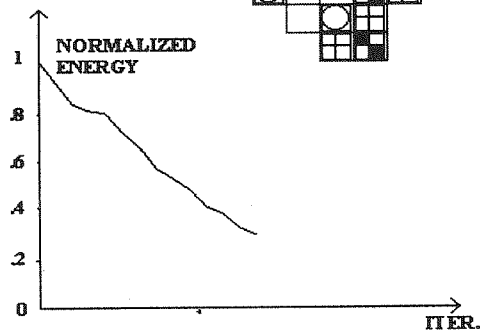
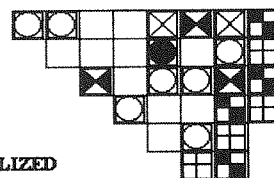
INITIAL ENRICHMENTS: 1.9% 1.9% 2.5% 2.5% 3.2% 3.2%
+BP +BP +BP +BP



HOPFIELD NETWORK (OUTPUT OF NEURONS)



REACTOR CORE (1/8)



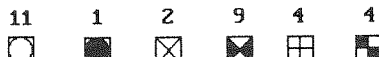
NETWORK ENERGY VERSUS ITERATIONS

شکل (۲) شبکه هوفیلد تحول ۵۵.

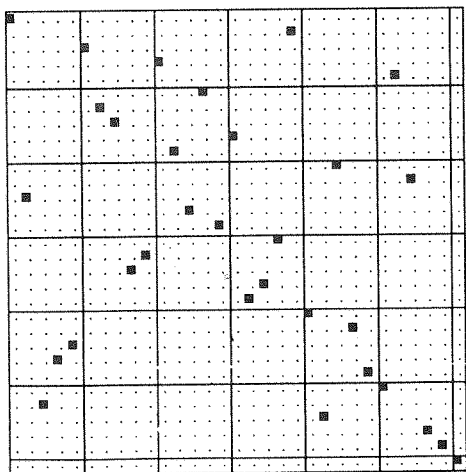
ITER= 1 FUEL CYCLE= 1

155 th STATE OF 484

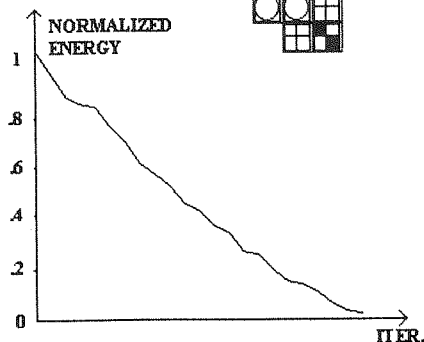
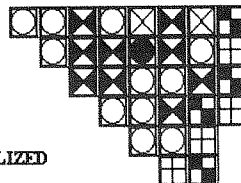
INITIAL ENRICHMENTS: 1.9% 1.9% 2.5% 2.5% 3.2% 3.2%
+BP +BP +BP +BP



HOPFIELD NETWORK (OUTPUT OF NEURONS)



REACTOR CORE (1/8)



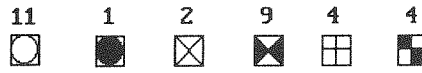
NETWORK ENERGY VERSUS ITERATIONS

شکل (۳) شبکه هوفیلد تحول ۱۵۵ (شبهه با انرژی ۰/۱۴۰۲ همگرا شده است).

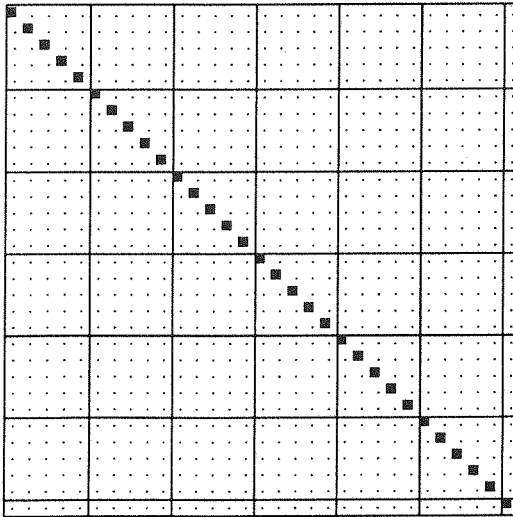
ITER= 1 FUEL CYCLE= 1

1 th STATE OF 484

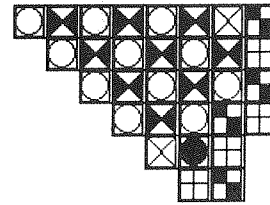
INITIAL ENRICHMENTS: 1.9% 1.9% 2.5% 2.5% 3.2% 3.2%
+BP +BP +BP +BP



HOPFIELD NETWORK (OUTPUT OF NEURONS)



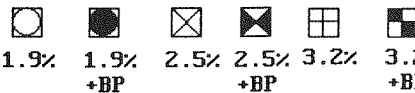
REACTOR CORE (1/8)



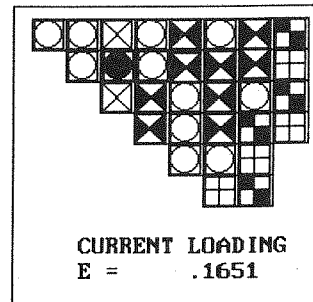
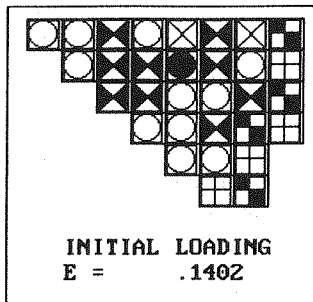
شکل (۴) طرح ارائه شده برای سیکل اول نیروگاه بوشهر توسط طراح (E=0.1118).

ITER= 1 FUEL CYCLE= 1
100th STATE OF 100

(TEMP.= 1.000) INITIAL ENRICHMENTS: 1.9% 1.9% 2.5% 2.5% 3.2% 3.2%
+BP +BP +BP +BP



SIMULATED ANNEALING PHASE

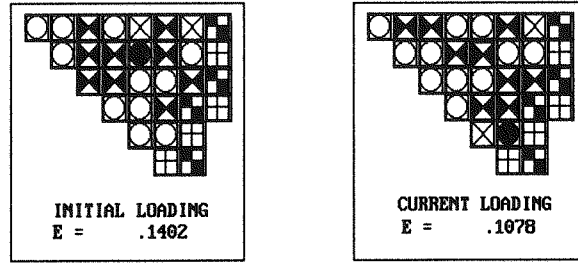


شکل (۵) متد سرد کردن تدریجی
Simulated Annealing (SA) - مرحله اول.

ITER= 43 FUEL CYCLE= 1
50th STATE OF 100

□ ■ ⊗ ⊗ ⊕ ⊕
(TEMP. = 0.011) INITIAL ENRICHMENTS: 1.9% 1.9% 2.5% 2.5% 3.2% 3.2%
+BP +BP +BP +BP

SIMULATED ANNEALING PHASE



شکل (۶) متد سرد کردن تدریجی Simulated Annealing (SA) - مرحله نهائی (E=0.1078).

مراجع

- [1] S.H. Levine, "In-Core Fuel Management of Four Reactor Types", Handbook of Nuclear Reactor Calculation, CRC Press, Vol. II, 1986.
- [2] Kim, Chang, Lee, "Pressurized Water Reactor Core Parameter Prediction using an Artificial Neural Network", Nucl. Science & Eng., 113, pp. 70-76, 1993.
- [3] J.H. Park, Y.S. Kim, I.K. Eom, K.Y. Lee, "Economic Load Dispatch for Piecewise Quadratic Cost Function using Hopfield Neural Network", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 8, No. 3, August 1993.
- [4] Kim, Chang, Lee, "Optimal Fuel Loading Pattern Design using an Artificial Neural Network and a Fuzzy Rule-Based System", Nucl. Science & Eng., 115, pp. 152-163, 1993.
- [5] Driscoll, Downar, Pilat, "The Linear Reactivity Model for Nuclear Fuel Management", American Nuclear Society, 1990.
- [6] J.J. Hopfield, "Neural Network and Physical Systems with Emergent Collective Computational Abilities", Proc. Natl. Acad. Sci., 79, 2554, 1982.
- [7] J.J. Hopfield, "Neurons with Graded Response Have Collective Computational Properties Like Those of Two-state Neurons", Proc. Natl. Acad. Sci., 81, 3088, 1984.
- [8] Peng, Gupta, Armitage, "An Investigation into Improvement of Local Minima of the Hopfield Network", Neural Networks, Vol. 9, No. 7, pp. 1241-1253, 1996.
- [9] Hopfield, Tank, "Neural Computation of Decisions in Optimization Problems", Springer-Verlag, 1985.
- [10] Kirkpatrick, "Optimization by Simulated Annealing: Quantitative Studies", Journal of Statistical Physics, Vol. 34, No. 5/6, 1984.
- [11] Kirkpatrick, Gellat, Vecchi, "Optimization by Simulated Annealing", Science, Vol. 220, No. 4598, pp. 671-680, 1983.
- [12] Freeman, Skapura, "Neural Networks Algorithms Application and Programming Techniques", Addison-Wesley Publishing Company, 1991.
- [13] H.Fowler T.B., Tobias M.L., Vondy D.R., "EXTERMINATOR-2: a FORTRAN IV Code for Solving Multigroup Neutron Diffusion Equations in Two Dimensions", ORNL-4078, OAK RIDGE NATIONAL LABORATORY, Oak Ridge, Tennessee, April 1967.
- [14] WIMS D-4 Code for Cell Calculation", United Kingdom Atomic Energy Authority-Reactor Group, 1975.
- [15] PSAR : Preliminary Safety Analysis Report", prepared for Bushehr NPP by KWU (Siemens) Company, 1975.