

التوزيع الاقتصادي البيئي للتوليد باستخدام خوارزمية مستعمرة النحل الاصطناعية

أ. محمد التجاني درفون، أ. أبوبكر حميدة حامد

قسم الهندسة الكهربائية، كلية التقنية الهندسية - هون، ليبيا

a.abobkr@ceh.edu.ly, m.darfoun@ceh.edu.ly

الملخص

بسبب الانبعاثات الناتجة عن استهلاك الوقود الأحفوري في محطات توليد الطاقة الكهربائية، لا ينبغي النظر في تكاليف التشغيل فحسب، بل يجب أيضاً مراعاة تقليل التلوث الناتج في مسائل توزيع الأحمال الكهربائية على محطات التوليد. في هذا البحث، تم مناقشة مسألة التوزيع الاقتصادي البيئي من خلال تقليل تكلفة التوليد والتلوث البيئي مع الأخذ في الاعتبار قيود التشغيل وتوازن الطاقة باستخدام خوارزمية مستعمرة النحل الاصطناعية. من أجل إظهار فعالية الخوارزمية المقترحة، تم اختبارها على منظومة طاقة كهربائية IEEE 30-bus ومقارنة النتائج التي تم الحصول عليها مع التوزيع المتساوي والعشوائي والسعوي. بينت النتائج أن التقنية المقترحة أكثر جدوى وكفاءة لإيجاد الحد الأدنى في تقليل التكاليف أو تقليل الانبعاثات أو كلاهما بحسب النسبة المقترحة من قبل صانع القرار.

كلمات مفتاحية: التوزيع الاقتصادي، التوزيع البيئي، إيجاد الأفضلية، خوارزمية مستعمرة النحل الاصطناعية، معامل الجزاء للسعر.

Environmental Economic Dispatch of Generation using Artificial Bee Colony Algorithm

Mohamed Darfoun, Abobkr Hamida

Electrical Engineering Department, College of Engineering Technology,
Houn, Libya

m.darfoun@ceh.edu.ly, a.abobkr@ceh.edu.ly

Abstract

Due to the emissions resulting from the consumption of fossil fuels in the electric power plants, not only operating costs should be considered, but also reducing the pollution in electric load distribution problem. In this paper, the economic/environmental load distribution were investigated by minimizing generation costs and environmental pollution, taking into account operation constraints and energy balance, by using artificial bee colony (ABC) algorithm. In order to demonstrate the effectiveness of the proposed algorithm, it was tested on an IEEE 30-bus electrical power system and the results obtained were compared with equal, random and size distributions. The results showed that the proposed technology is more feasible and efficient to find the minimum in reducing costs or reducing emissions, or both, according to the percentage proposed by the decision maker.

Keywords: economic distribution, environmental distribution, optimization, artificial bee colony algorithm, price penalty factor.

1. مقدمة

أدى التوسع في ربط محطات توليد الطاقة الكهربائية لتكوين منظومة قوى تغذي عدداً كبيراً من الأحمال، ونظراً لارتفاع تكاليف الوقود على مستوى العالم، وزيادة الطلب على الكهرباء، وتزايد الاهتمام بالبيئة، تسعى مرافق الطاقة جاهدة لتحقيق التوزيع الأمثل لشبكاتها الكهربائية، بحيث يتم توزيع الأحمال على جميع محطات التوليد باختلاف أنواعها لكي تغذيها بأقل تكلفة ممكنة وأقل نسبة من الانبعاثات الغازية الملوثة للبيئة.

يُعد التوزيع الاقتصادي Economic Dispatch أحد أهم القضايا الأساسية في تشغيل نظم القوى والتحكم فيها لتوزيع الأحمال بين محطات التوليد. الهدف الرئيسي من التوزيع

الاقتصادي للأحمال هو تحديد مقدار الطاقة الحقيقية التي يجب أن تساهم بها المولدات والتي تلمي طلب الحمل في أي وقت، وتخضع لقيود التوزيع بحيث يتم تقليل إجمالي تكلفة التوليد [1]. على الرغم من حقيقة أن التوزيع الاقتصادي يحسن أو يخفض تكاليف وقود المولدات، إلا أنه لا يزال غير قادر على حل مشكلة التلوث البيئي الناتجة عن حرق الوقود في محطات التوليد، بالتالي نحتاج إلى تسليط الضوء على مسألة التوزيع البيئي Environmental Dispatch لمحطات التوليد التي تهدف إلى توزيع الأحمال على المحطات لتغذيها بحيث تنتج أقل نسبة ممكنة من الانبعاثات [2]. عندما يتم تقليل الانبعاثات إلى الحد الأدنى، قد تكون تكلفة الوقود مرتفعة بشكل غير مقبول، في المقابل عندما يتم تقليل تكلفة الوقود إلى الحد الأدنى، قد تكون نسبة الانبعاثات عالية. لذلك، تم اقتراح فكرة التوزيع الاقتصادي البيئي Environmental Economic Dispatch في مجال توليد الطاقة الكهربائية، والذي يُقلل من تكلفة الوقود والتلوث البيئي في نفس الوقت، بحيث يتم دمجهما كهدف موحد عند توزيع الحمل على محطات التوليد.

قام الباحثون في هذا المجال بإجراء عدة دراسات للحصول على قيم القدرة الأكثر ملائمة، التي تنتجها المولدات بناءً على تكاليف الوقود، حيث حققوا نتائج مرضية باستخدام طرق وخوارزميات تحسين مختلفة. تم تقديم عدد من الطرق لحل مسألة التوزيع الاقتصادي البيئي [3]، مثل خوارزمية التطور التفاضلي، والخوارزمية الجينية، وخوارزمية مستعمرة النحل الاصطناعية، وخوارزمية سرب الطيور، وخوارزمية النمل، وغيرها. أصبح ذكاء السرب في السنوات الأخيرة موضع اهتمام للباحثين في مجالات مختلفة.

تُعد خوارزمية مستعمرة النحل الاصطناعية (ABC) Artificial Bee Colony Algorithm عضواً جديداً في عائلة ذكاء السرب [2]. تحاول خوارزمية ABC محاكاة السلوك الطبيعي للنحل في البحث عن الطعام والبحث عن مصادر جديدة ذات جودة عالية، هذا يجعلها مُرشحاً جيداً لتطوير خوارزميات بحث ذكية جديدة. في هذه الدراسة تم تطبيق خوارزمية ABC باستخدام برنامج الـ MATLAB، على منظومة طاقة كهربائية IEEE 30-bus تحوي على 6 محطات توليد لتغذية الأحمال المربوطة بها. تم تطبيق اختبار التوزيع الاقتصادي و اختبار التوزيع البيئي ومقارنة النتائج مع التوزيع المتساوي

و التوزيع العشوائي والتوزيع بحسب السعة، ثم مقارنة جميع النتائج المتحصل عليها للتأكد من فعالية واعتمادية الخوارزمية، وختاماً بأختبار التوزيع الأقتصادي البيئي للتوليد كخيار استراتيجي يستطيع صانع القرار من أختيار التشغيل المناسب حسب الرغبة والقيود المشروطة.

2. صياغة المسألة

توصف الأمثلية Optimization بأنها عملية الحصول على أفضل حل للوصول إلى هدف ما، مع تلبية عدد من القيود. عملية الوصول إلى الحل الأمثل تعرف كذلك بعملية التحسين [4]. عادةً ما يكون أفضل حل عبارة عن أكبر أو أصغر قيمة يمكن الحصول عليها، وذلك من خلال بناء نموذج تحسين ينطوي على تحديد العناصر الثلاثة الآتية:

1. دالة هدف، يمكن أن تكون دالة خطية أو غير خطية. تُعطي مقياساً لجودة

الحل الذي تم الحصول عليه.

2. المتغيرات التي تؤدي إلى الحل الأمثل، التي تُحسن من عمل دالة الهدف. يتم

تصنيفها على أنها متغيرات ثنائية أو منفصلة أو مستمرة أو مجموعة منها.

3. القيود التي تُفرض على المتغيرات (إن وجدت). عادةً، يتم تمثيلها بالعلاقات

المنطقية (أكبر من أو أصغر من أو يساوي أو لا يساوي).

تتم نمذجة مسائل التحسين رياضياً كالآتي:

$$\text{Min } F(x_1, x_2, \dots) \quad (1)$$

وتخضع للقيود الآتية:

$$R_1(x_1, x_2, \dots) = 0 \quad (2)$$

$$R_2(x_1, x_2, \dots) \leq 0 \quad (3)$$

حيث:

$F(x_1, x_2, \dots)$ دالة الهدف.

x_1, x_2 : متغيرات الحل.

R_1, R_2 : قيود المسألة (نطاق البحث عن الحل الذي تفرضه المسألة).

1.2. دالة الكلفة

تشمل تكاليف التوليد تكلفة الوقود المستخدم لإنتاج الطاقة الكهربائية وتكلفة الصيانة للمحطة وتكلفة الفقد في القدرة وتكلفة بدء وإيقاف تشغيل المحطة. إن المولد الأكثر كفاءة لا يضمن الحد الأدنى من التكلفة، لأن تكلفة الوقود هي أهم العوامل التي تؤثر على توليد الطاقة الكهربائية [5]. كلفة الوقود الاجمالية C_t لمحطات التوليد يمكن التعبير عنها رياضياً كما في المعادلة (4):

$$C_t = \sum_{i=1}^n a_i P_i^2 + b_i P_i + c_i \quad (4)$$

حيث: n عدد محطات التوليد، a_i, b_i, c_i معاملات الكلفة لكل محطة، P_i القدرة الخارجة لكل محطة.

2.2. الانبعاثات

على الرغم من أن الكهرباء هي شكل نظيف وآمن للطاقة نسبياً عند استخدامها، إلا أن توليد الكهرباء ونقلها يؤثران على البيئة والصحة العامة للإنسان، حيث تعتبر المحطات الحرارية من أهم مصادر لانبعاثات الغازات الملوثة الناتجة عن حرق الوقود الاحفوري مثل ثاني أكسيد الكربون CO_2 ، وثاني أكسيد الكبريت SO_2 ، وأكاسيد النيتروجين NO_x . والتي تعتمد على مقدار القدرة الناتجة من هذه المحطات. يتم حساب كمية الانبعاثات الكلية E_t كالتالي [5]:

$$E_t = \sum_{i=1}^n d_i P_i^2 + e_i P_i + f_i \quad (5)$$

حيث: d_i, e_i, f_i معاملات الانبعاث لكل محطة.

3.2. قيود التشغيل

تخضع معادلة الكلفة ومعادلة الانبعاثات إلى شرطين وقيدتين أساسيين؛ أولاً، أن تكون قيمة القدرة المتولدة الكلية مساوية للحمل المطلوب تغذيته، بالإضافة إلى القدرة المفقودة أثناء النقل:

$$\sum_{i=1}^n P_i = P_D + P_L \quad (6)$$

حيث: P_D أجمالي الطلب، P_L الفقد الكلي. ثانياً، أن تكون قيم جميع القدرات تقع ضمن قيود التشغيل لكل مولد، حيث يجب ألا تتجاوز القدرة الناتجة عن كل محطة أقصى قيمة لها، وألا تقل عن الحد الأدنى لقدرة التشغيل الخاصة بكل مولد، كما موضح بالعلاقة (7):

$$P_i^{min} \leq P_i \leq P_i^{max} \quad (7)$$

تم حساب الفقد الكلي P_L باستخدام صيغة كرون [6]، المتمثلة في المعادلة (8):

$$P_L = \sum_{i=1}^n P_i B_{ij} P_j \quad (8)$$

حيث: B_{ij} تمثل معاملات الفقد للمنظومة.

3. مستعمرة النحل الاصطناعية

تُعد خوارزمية مستعمرة النحل الاصطناعية Artificial Bee Colony – ABC التي اقترحها الباحث التركي كارابوجا في عام 2005 [7]، من تقنيات التحسين الحديثة، المستوحاة من السلوك الجماعي لمستعمرات الحشرات الاجتماعية، وهي خوارزمية إرشادية تعتمد على ذكاء سرب النحل [8]. ينقسم النحل المُكَلَّف بالبحث عن مصادر الطعام إلى ثلاث فئات، النحل العامل والنحل المراقب والنحل الكشاف. النحل العامل مسؤول عن متابعة مصادر الطعام الحالية وإرسال المعلومات للنحل المراقب حول جودة هذه المصادر، ويقرر النحل المراقب مصدر الطعام الذي سيتم استخدامه بناءً على معلومات النحل العامل. يقوم النحل الكشفي بالبحث في البيئة بشكل عشوائي من أجل العثور على مصدر جديد.

تمثل العمليات في مستعمرة النحل نصف المستعمرة، بينما تمثل المراقبات النصف الآخر. يتم تكليف نحلة عاملة واحدة فقط لكل مصدر طعام. لذا فعدد مصادر الطعام المحيطة بالخلية يساوي عدد العمليات. تقوم العمليات باستغلال مصادر الطعام ومشاركة جودته مع المراقبات في الخلية. تقوم المراقبات باختيار المصادر الأعلى جودة لأن لديها احتمال أكبر لوجود مصادر أفضل قريبة منها. بمجرد أن تستنفذ العمليات مصادر الطعام، تبدأ الكشافات دورة البحث عن مصادر جديدة. يمكن تقسيم هذه الآلية على ثلاثة مراحل على النحو الآتي:

1.3. مرحلة النحلات العمليات

في هذه المرحلة يتم توليد حلول مبدئية عشوائياً x_{ij} ، ضمن نطاق البحث $[L, U]$ ، باعتبارها معلومات المصادر لدالة الهدف $f(x)_i$ التي يتم استغلالها من قبل العمليات.

$$x_{ij} = L + rand(U - L) \quad (9)$$

حيث:

i : تمثل عدد مصادر الطعام.

j : تمثل عدد الأبعاد.

L و U : هي قيمة الحد الأعلى والحد الأدنى على التوالي لنطاق البحث.

تقوم العمليات بتقييم جودة المصادر التي تقوم باستغلالها من خلال المعادلة (10):

$$fit = \begin{cases} \frac{1}{1 + f(x)} & ; f(x) \geq 0 \\ 1 + |f(x)| & ; f(x) < 0 \end{cases} \quad (10)$$

حيث:

$f(x)$ دالة الهدف (الحل الأمثل).

تقوم العمليات بالعثور على مصادر جديدة بناءً على معلومات المصادر الحالية، وذلك باختيار معلومات أحد المصادر (x_{ij}) عشوائياً لتحسينه، ومقارنته مع معلومات مصدر آخر يختار عشوائياً يعرف بالمصدر المرافق (x_{pj}) من خلال المعادلة (11).

$$x_{ij(new)} = x_{ij} + \varphi(x_{ij} - x_{pj}); \quad p \neq i \quad (11)$$

حيث:

$X_{ij(new)}$: معلومات المصدر المجاور الجديد.

X_{ij} : معلومات أحد المصادر الحالية.

X_{pj} : معلومات مصدر آخر تم اختياره عشوائياً.

φ : قيمة عشوائية تنتمي للفترة $[-1, 1]$.

2.3. مرحلة النحلات المراقبات

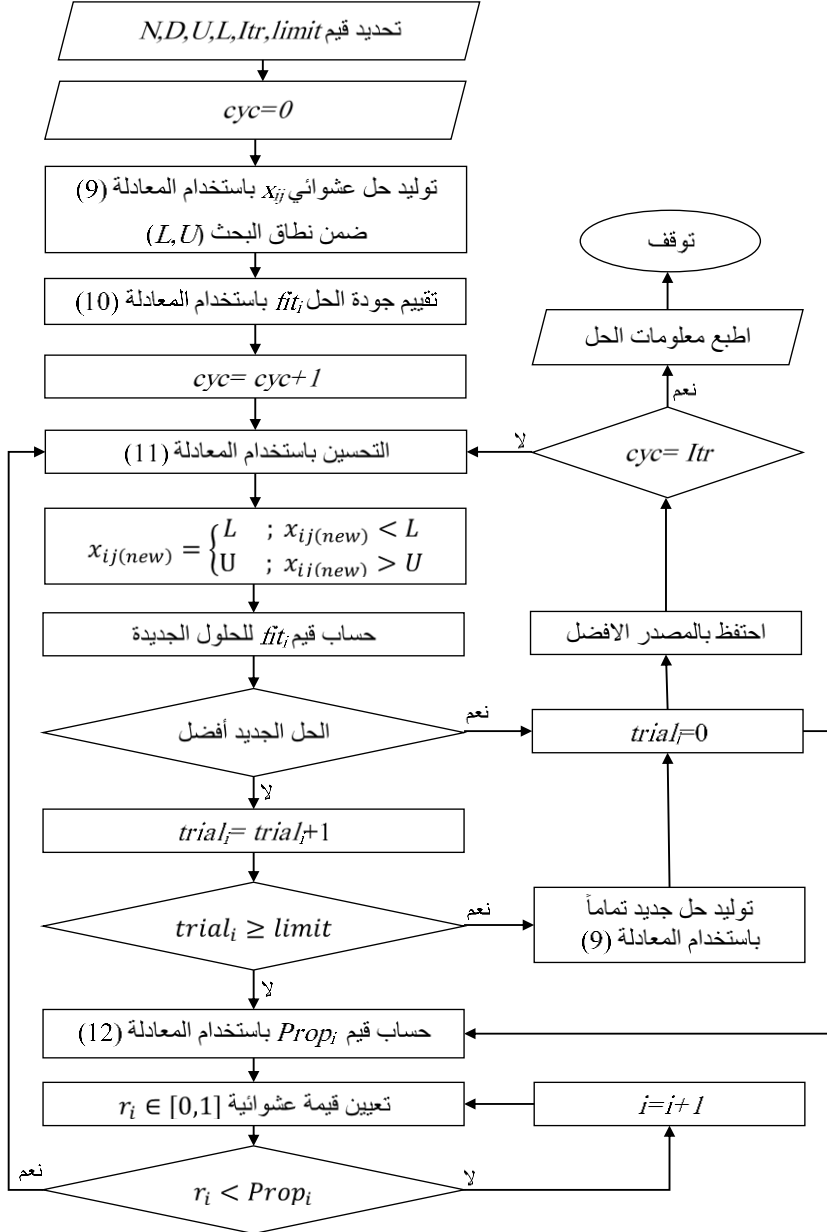
تقوم العوامل بمشاركة معلومات المصادر مع النحلات المراقبات باستخدام دالة الاحتمال الموضحة في (12)، حيث تقوم بحساب احتمال وجود مصادر أفضل لكل مصدر بالنظر إلى جودتها، كالتالي:

$$Prop_i = \frac{fit_i}{\sum fit_i} \quad (12)$$

فالمصدر الذي لديه أعلى جودة، لديه أعلى احتمال لاختياره في عملية التحسين من قبل المراقبات، حيث تتم عملية التحسين بنفس الطريقة المستخدمة من قبل العوامل.

3.3. مرحلة النحلات الكشافات

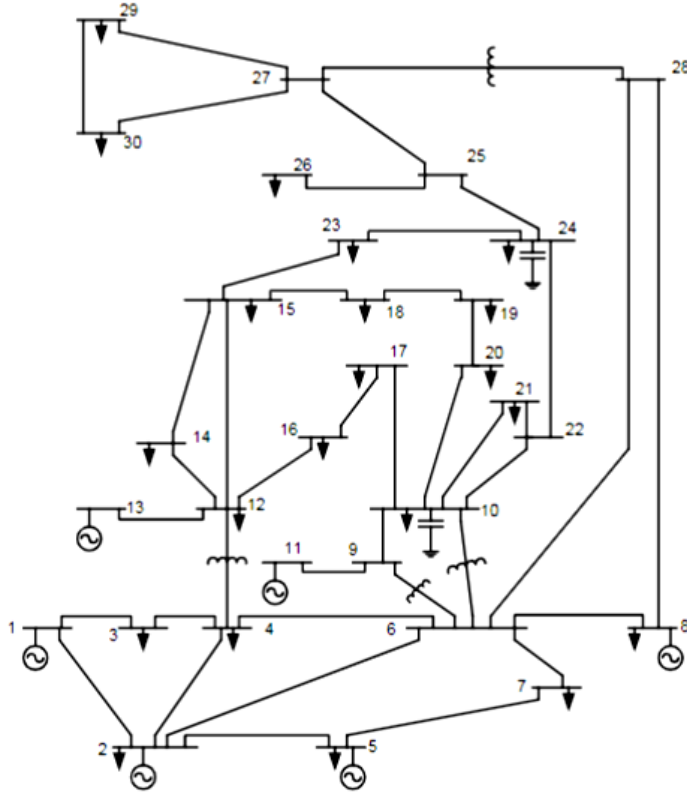
تعطى فرصة للمصادر ذات جودة منخفضة للتحسين، ولكن إن تجاوزت عدد محاولات التحسين الفاشلة قيمة تعرف بقيمة الحد، يتم الاستغناء عن المصدر، وتحويلها إلى نحلة كشافة تقوم بالبحث عن مصدر طعام جديد عشوائياً من خلال المعادلة (9). وبمجرد تحديد المصدر الجديد، تبدأ دورة بحث أخرى من خوارزمية ABC. نفس العمليات تتكرر حتى يتم استيفاء المعايير أو الشروط المطلوبة من الحل، وتتوقف عندها عملية البحث. شكل (1) يوضح المخطط الانسيابي لخوارزمية ABC.



شكل (1) المخطط الانسيابي لخوارزمية ABC

4. الاختبارات والمناقشة

في هذه الدراسة تم استخدام منظومة طاقة كهربائية IEEE 30-bus وهي منظومة اختبار تستخدم في العديد من الأبحاث والدراسات [9]، مكونة من 30 قضيب تغذي حمل قدره 750MW عن طريق 6 محطات توليد كما بالشكل (2).



شكل (2) منظومة طاقة كهربائية IEEE 30-bus

توضح المعادلة (13) قيم مصفوفة معاملات الفقد للمنظومة، أما بيانات دالة الكلفة والانبعاثات وحدود التوزيع لمحطات التوليد في المنظومة موضحة بالجدول (1)، (2)، (3) على التوالي.

تم استلام الورقة بتاريخ: 2023/12/15 م وتم نشرها على الموقع بتاريخ: 2024/1/14 م

$$B_{ij} = \begin{bmatrix} 20.22 & -2.86 & -5.34 & -5.65 & -4.54 & -1.03 \\ -2.86 & 32.43 & 0.16 & -3.07 & 4.22 & -1.47 \\ -5.34 & 0.16 & 20.85 & 8.31 & 0.23 & -2.7 \\ -5.65 & -3.07 & 8.31 & 11.29 & 1.13 & -2.95 \\ -4.54 & 4.22 & 0.23 & 1.13 & 4.6 & -1.53 \\ -1.03 & -1.47 & -2.7 & -2.95 & -1.53 & 8.98 \end{bmatrix} \times 10^{-4} \quad (13)$$

جدول (1) معاملات الكلفة لمنظومة الطاقة الكهربائية IEEE 30-bus

Gen.	a (\$/MW ² h)	b (\$/MWh)	c (\$/h)
1	0.1525	38.5397	756.799
2	0.1059	46.1592	451.325
3	0.0280	40.3966	1049.32
4	0.0355	38.3055	1243.53
5	0.0211	36.3278	1658.57
6	0.0180	38.2704	1356.27

جدول (2) معاملات لانبعاثات لمنظومة الطاقة الكهربائية IEEE 30-bus

Gen.	d (kg/MW ² h)	e (kg/MWh)	f (kg/h)
1	0.0042	0.3277	13.8593
2	0.0042	0.3277	13.8593
3	0.0068	0.5455	40.2669
4	0.0068	0.5455	40.2669
5	0.0046	0.5112	42.8955
6	0.0046	0.5112	42.8955

جدول (3) حدود التوزيع لمولدات المنظومة الطاقة الكهربائية IEEE 30-bus

Gen.	P ^{min} (MW)	P ^{max} (MW)
1	10	125
2	10	150
3	40	250
4	35	210
5	125	325
6	125	315

تم كتابة شفرة على برنامج MATLAB لاختبار هذه المنظومة والتأكد من صلاحية الطريقة المقترحة في الحصول على نتائج مرضية وذلك بناءً على المخطط الانسيابي للخوارزمية مع تغيير وتعديل المعاملات والرموز الرياضية المستخدمة في الخوارزمية الى ما يناظرها من معطيات ومقننات منظومة الاختبار قيد الدراسة. جدول (4) يوضح معاملات الخوارزمية التي تم استعمالها.

جدول (4) معاملات خوارزمية ABC

S = 240	عدد المصادر
N = 40	عدد النحل
D = 6	عدد الحلول
I _{tr} = 300	الدورات
Limit = 150	القيمة الحدية

تم تطبيق خوارزمية ABC لإيجاد التوزيع الاقتصادي والتوزيع البيئي، ولمعرفة مدى جودة وكفاءة الحلول التي تم الحصول عليها، تمت مقارنتها مع نتائج طرق توزيع أخرى للأحمال متمثلة في:

- توزيع الأحمال بالتساوي على المولدات.
- توزيع الأحمال عشوائياً على المولدات.
- توزيع الأحمال حسب سعة المولدات.

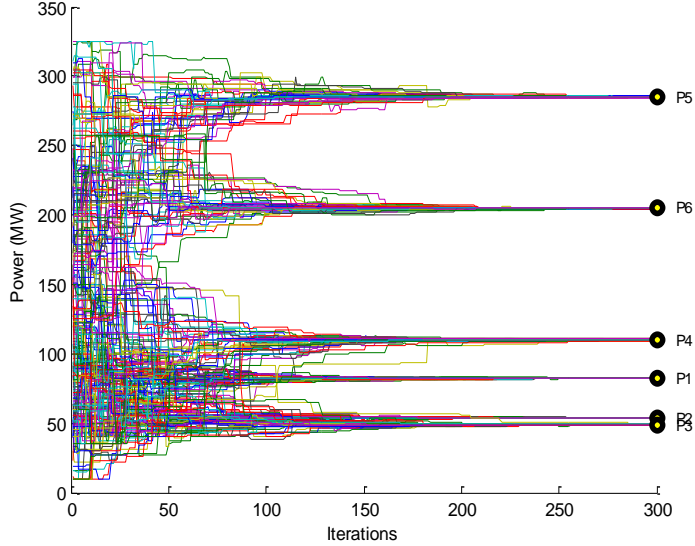
تم مراعاة شروط التوزيع أثناء استخدام هذه الاختبارات، والتي تقضي بأن تكون القدرة الخارجة من كل مولد ضمن حدوده التشغيلية المصمم عليها، بالإضافة إلى وجوب تساوي إجمالي القدرة الناتجة ومفايد القدرة في خطوط النقل قيمة الحمل الكلي المطلوب. وختاماً تم دراسة التوزيع الاقتصادي البيئي للأحمال كأحد الخيارات الاستراتيجية المتاحة لصانع القرار لإيجاد أفضل الحلول.

1.4. التوزيع الاقتصادي

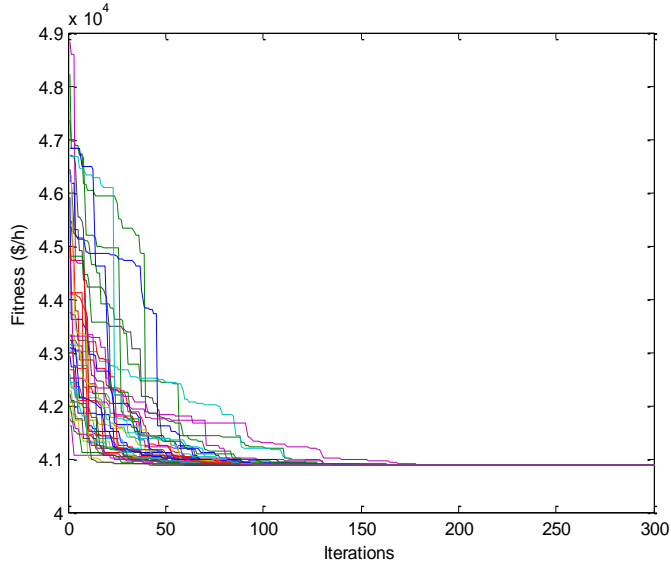
في هذا الاختبار سيكون الهدف هو توزيع الحمل الكلي والمقدر بـ 750 MW اقتصادياً على 6 مولدات، بحيث تكون التكلفة الاجمالية للوقود المستخدم في توليد الطاقة الكهربائية أقل ما يمكن. أي أن دالة الهدف في هذه الحالة ستكون تقليل تكلفة التوليد الكلية للمنظومة والمعرفة بالمعادلة (4).

تم تطبيق خوارزمية ABC المقترحة، وبتتبع أداء عملها حيث نلاحظ في شكل (3) قيم خرج المحطات المعطى من كل نحلة خلال مسيرة بحثها عن مصادر الطعام (الحل الأمثل). حيث نلاحظ أنه في بداية الدورات البحثية تكون القيم متشتتة وغير مثالية وفي مدى واسع ولكن مع مرور الدورات ونتيجة لمراحل البحث المتزامنة للنحلات بين الاستغلال والاستكشاف، فإن قيم خرج المحطات تتضح وتبرز مع كل دورة بحث، حيث تبدأ معظم النحلات في الوصول إلى الحل، وتبدأ في الاستقرار تقريباً بداية من الدورة الـ 150. أما شكل (4) فيوضح قيمة دالة الهدف، حيث نلاحظ عملية تحسن الحل وكيفية انخفاض قيمة التكلفة الكلية بمرور دورات البحث إلى أن تستقر عند أدنى قيمة لها بداية من الدورة رقم 200.

تم استلام الورقة بتاريخ: 2023/12/15 م وتم نشرها على الموقع بتاريخ: 2024/1/14 م



شكل (3) أداء خوارزمية ABC في التوزيع الاقتصادي (خرج المحطات)



شكل (4) أداء خوارزمية ABC في التوزيع الاقتصادي (التكلفة الكلية)

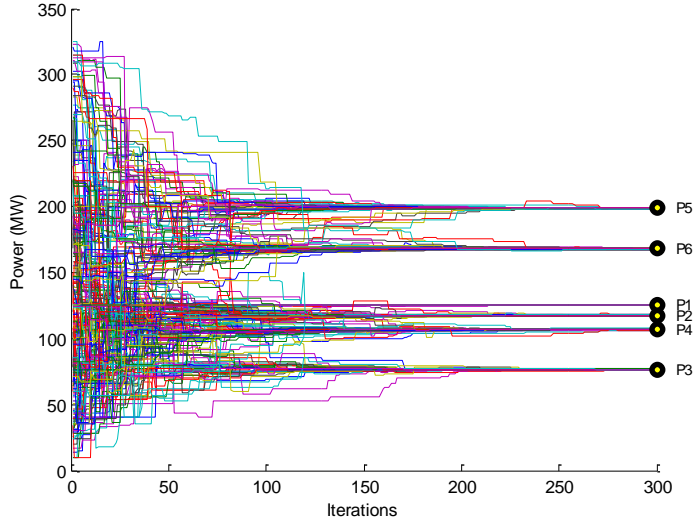
الجدول (5) يوضح قيم النتائج النهائية وهي تمثل أفضل تشغيل اقتصادي لمحطات التوليد المربوطة بالشبكة، حيث بلغ أدنى كلفة متحصل عليها $40,882 \text{ \$/h}$ ، أما قيمة أجمالي الانبعاثات من هذه المحطات فقد بلغت $1,284 \text{ kg/h}$.

جدول (5) نتائج التوزيع الاقتصادي لمحطات التوليد

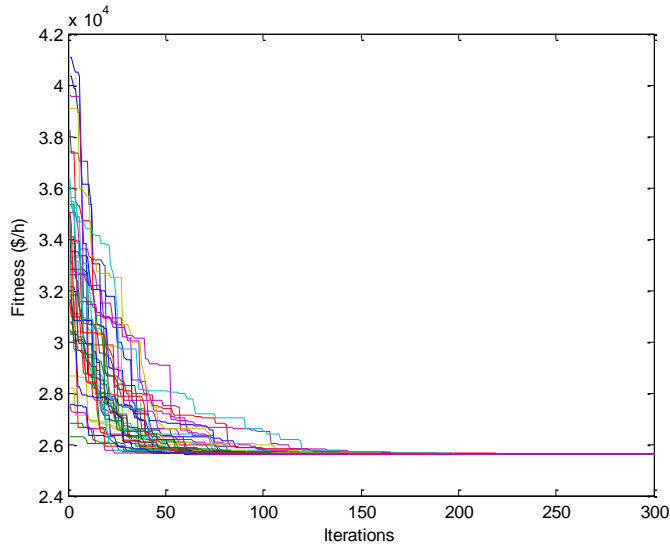
P_1 (MW)	82.21	P_D (MW)	750
P_2 (MW)	54.07	$\sum P_i$ (MW)	785.35
P_3 (MW)	48.64	P_L (MW)	35.35
P_4 (MW)	110.36	C_t (\\$/h)	40,882
P_5 (MW)	285.19	E_t (kg/h)	1,284
P_6 (MW)	204.88		

2.4. التوزيع البيئي

الهدف فيهذا الاختبار هو الحصول على أفضل تشغيل للمولدات، بحيث تكون قيمة الانبعاثات الملوثة الصادرة عن المحطات أثناء تشغيلها أقل ما يمكن، أي أن دالة الهدف ستكون دالة الانبعاثات الموضحة في المعادلة (5). تم تطبيق خوارزمية ABC، حيث يوضح شكل (5) قيم خرج المحطات المعطى من كل نحلة خلال مسيرة بحثها عن مصادر الطعام (الحل الأمثل). أما شكل (6) فيوضح قيمة دالة الهدف والتي تعبر عن كمية الانبعاثات الكلية الصادرة عن محطات التوليد. بالمقارنة مع الأشكال السابقة في التوزيع الاقتصادي، نلاحظ وجود تشابه كبير في سلوك النحلات أثناء الدورات البحثية مع أداءها في التوزيع البيئي.



شكل (5) أداء خوارزمية ABC في التوزيع البيئي (خرج المحطات)



شكل (6) أداء خوارزمية ABC في التوزيع البيئي (إجمالي الانبعاثات)

يوضح الجدول (6) قيم النتائج النهائية للتشغيل البيئي لخرج محطات التوليد المتحصل عليها من الخوارزمية المقترحة، حيث بلغت قيمة إجمالي الانبعاثات من هذه المحطات 1,115 kg/h أما التكلفة فبلغت \$/h 43,357. من الواضح جداً أن كمية الانبعاثات أقل بكثير من الحل السابق بينما التكلفة الكلية ارتفعت.

جدول (6) نتائج التوزيع البيئي لمحطات التوليد

P_1 (MW)	125	P_D (MW)	750
P_2 (MW)	117.58	$\sum P_i$ (MW)	792.82
P_3 (MW)	76.61	P_L (MW)	42.82
P_4 (MW)	106.78	C_t (\$/h)	43,357
P_5 (MW)	198.90	E_t (kg/h)	1,115
P_6 (MW)	167.95		

3.4. التوزيع المتساوي

ويقصد به توزيع الحمل الكلي على محطات التوليد بالتساوي، أي أن كل محطة ستولد نفس الطاقة الكهربائية مع مراعاة شروط التشغيل، وتقدر هذه القيمة باستخدام المعادلة (14).

$$P_i = \frac{P_D - P_L}{D} \quad (14)$$

حيث: P_D الحمل الكلي للمنظومة و D عدد المحطات.
بعد الحصول على قيم خرج المحطات يتم حساب قيمة التكلفة والانبعاثات الكلية. الجدول (7) يوضح قيمة التكلفة الاجمالية والانبعاثات المترتبة من هذا التوزيع.

جدول (7) نتائج توزيع الأحمال بالتساوي على محطات التوليد

P_1 (MW)	140.58	P_D (MW)	750
P_2 (MW)	140.58	$\sum P_i$ (MW)	843.48
P_3 (MW)	140.58	P_L (MW)	93.48
P_4 (MW)	140.58	C_t (\$/h)	47,108
P_5 (MW)	140.58	E_t (kg/h)	1,201
P_6 (MW)	140.58		

4.4. التوزيع العشوائي

وتعني اختيار قيم عشوائية ضمن قيود التوزيع لكل مولد مع مراعاة شروط التوزيع. تم وضع قيم عشوائية للقدرة كما في (15).

$$P_i = [125 \ 140 \ 50 \ 100 \ 185 \ 150] \quad (15)$$

الجدول (8) يوضح قيمة التكلفة الاجمالية والانبعاثات المترتبة من هذا التوزيع، حيث نلاحظ أن قيمة P_5 أصبحت قيمتها 229.3 MW بعد أن كانت 185 MW، وهذا بسبب الفرق بين مجموع القدرة الخارجة والحمل المطلوب، حيث تم إضافة المقدار عند المولد الذي تقبل سعته الزيادة في التوليد.

جدول (8) نتائج توزيع الأحمال عشوائياً على محطات التوليد

P_1 (MW)	125	P_D (MW)	750
P_2 (MW)	140	$\sum P_i$ (MW)	794.31
P_3 (MW)	50	P_L (MW)	44.31
P_4 (MW)	100	C_t (\$/h)	44,113
P_5 (MW)	229.31	E_t (kg/h)	1136
P_6 (MW)	150		

5.4. التوزيع السعوي

في هذا الاختبار تم توزيع الأحمال نسبة الى السعة القصوى لكل مولد P^{max} باستخدام المعادلة (16).

$$P_i = P_D \left(\frac{P_{max}}{\sum P_{max}} \right) \quad (16)$$

بإعادة حساب التكلفة الكلية للوقود والانبعثات تم الحصول على النتائج المدرجة في الجدول (9).

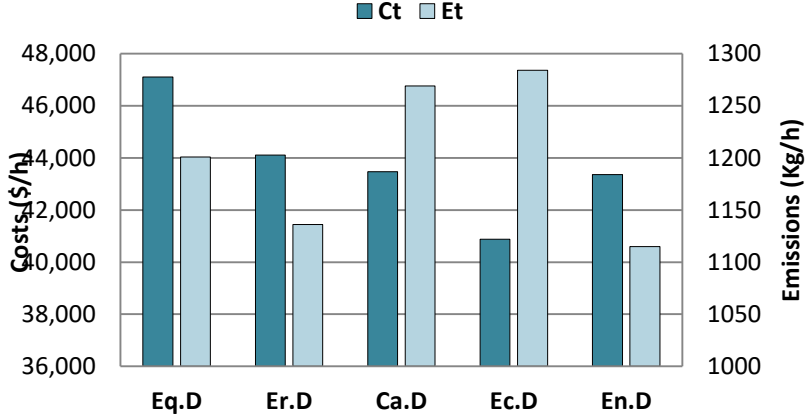
جدول (9) نتائج توزيع الأحمال نسبة الى سعة محطات التوليد

P_1 (MW)	75.64	P_D (MW)	750
P_2 (MW)	90.76	$\sum P_i$ (MW)	831.99
P_3 (MW)	151.27	P_L (MW)	81.99
P_4 (MW)	127.07	C_t (\$/h)	43,465
P_5 (MW)	196.65	E_t (kg/h)	1269
P_6 (MW)	190.60		

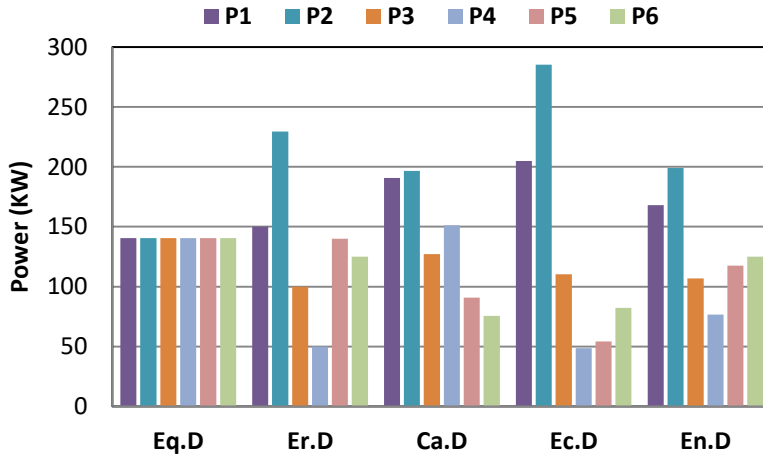
6.4. مقارنة النتائج

يوضح الشكل (7) مقارنة شاملة لقيم إجمالي التكلفة والانبعثات لمحطات التوليد المتحصل عليها من الاختبارات السابقة. تؤكد هذه النتائج أن أقل تكلفة تم الحصول عليها عند استخدام طريقة التوزيع الاقتصادي، بينما تم الحصول على الحد الأدنى من الانبعثات الناتجة من المحطات عند استخدام طريقة التوزيع البيئي. وهذا يؤكد جودة وكفاءة استخدام خوارزمية ABC حسب الهدف المرغوب سواءً التوزيع الاقتصادي أو التوزيع البيئي. الشكل (8) يوضح مقارنة لخرج المحطات لكافة الاختبارات السابقة.

تم استلام الورقة بتاريخ: 2023/12/15 م وتم نشرها على الموقع بتاريخ: 2024/1/14 م



شكل (7) مقارنة الكلفة والانبعاثات الناتجة لطرق التوزيع المختلفة



شكل (8) مقارنة خرج المحطات لطرق التوزيع المختلفة

7.4. التوزيع الاقتصادي البيئي

تفرض بعض الدول قيود صارمة حول نسبة الانبعاثات بحيث لا تتجاوز قدر معين [10]. وفي نفس الوقت ترغب الشركات المزودة للطاقة الكهربائية بإنتاج الطاقة بأقل تكلفة إجمالية والتي تتضمن تكلفة الوقود. يتم توزيع الأحمال توزيعاً اقتصادياً وبيئياً على

المولدات وذلك بتوحيد دالة الهدف لتصبح دالة هدف مجمعة [11]، تشمل تكاليف الوقود والانبعثات معاً كالتالي:

$$MinF_t = w \sum_{i=1}^n C_i + (1 - w) \sum_{i=1}^n h_i E_i \quad (17)$$

حيث h_i : معامل الجزاء للسعر [9]. w وزن مقداره 0.5. تقاس تكلفة الوقود بالعملة المستخدمة في الدراسة لكل ساعة أو بصفة عامة نضع رمز الدولار ($\$/h$)، أما الانبعثات فتقاس بكمية الانبعثات بالكيلوجرام خلال الساعة (kg/h)، ونظراً لاختلاف هذه المقاييس فلا يمكن جمعها مباشرة، حيث سيكون تأثير المقياس الأصغر ضئيل جداً، وإذا كان الفارق كبير فلن يكون له أي تأثير. لذلك وجب الاستعانة بمعامل الجزاء للسعر الذي يعادل بين مقياسي الكلفة والانبعثات [9]. يمكن إيجاد قيمة هذا المعامل لكل محطة توليد كالتالي:

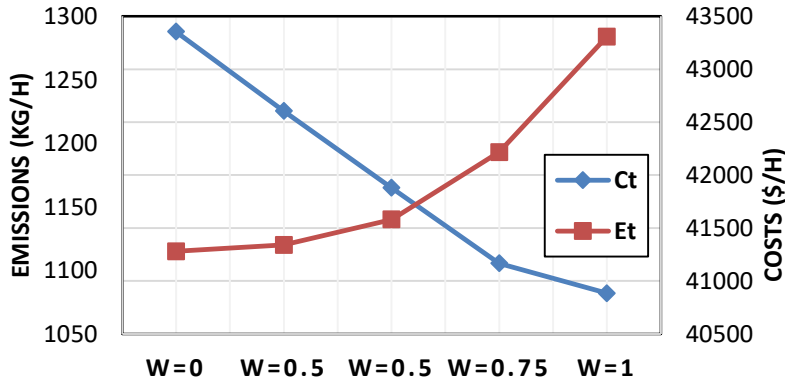
$$h_i = \frac{C_i(P_i^{max})}{E_i(P_i^{max})} \quad (18)$$

تم تطبيق خوارزمية ABC المقترحة على دالة الهدف المجمعة والحصول على النتائج، الجدول (10) يوضح قيم النتائج النهائية وهي تمثل أفضل توزيع اقتصادي بيئي للحمل الكلي على محطات التوليد المربوطة بالشبكة، حيث بلغت تكلفة الوقود $40,882 \$/h$ ، أما قيمة أجمالي الانبعثات الصادرة من المحطات فبلغت $1,284 kg/h$. بمقارنة هذه النتائج مع النتائج السابقة المتحصل عليها في التوزيع الاقتصادي جدول (5) والتوزيع البيئي جدول (6). نلاحظ أن التوزيع الاقتصادي البيئي خيار يتوسط الاختبارين الآخرين من ناحية الكلفة والانبعثات.

جدول (10) نتائج التوزيع الاقتصادي البيئي لمحطات التوليد

P_1 (MW)	82.21	P_D (MW)	750
P_2 (MW)	54.07	$\sum P_i$ (MW)	1524
P_3 (MW)	48.64	P_L (MW)	35.33
P_4 (MW)	110.36	C_t (\$/h)	40,882
P_5 (MW)	285.19	E_t (kg/h)	1284
P_6 (MW)	204.88		

في حالة تجاوزت كمية الانبعاثات الملوثة الحدود المسموح بها أو أن تكاليف الوقود لأنتاج الطاقة لازالت عالية في نظر مزود الخدمة، فإنه يمكن لصانع القرار التحكم وتغيير نسبة المفاضلة في الأهداف بين الانبعاثات والتكاليف، وذلك بتغيير قيمة الوزن w في دالة الهدف المجمعة. إذا كان صانع القرار مهتم أكثر في تقليل التكاليف على حساب كمية الانبعاثات، يتم رفع قيمة الوزن ($w > 0.5$)، أما إذا كانت الرغبة عكس ذلك يتم تقليل قيمة الوزن ($w < 0.5$)، يوضح الشكل (9) مقارنة للتكاليف والانبعاثات عند التوزيع الاقتصادي والتوزيع البيئي والتوزيع الاقتصادي البيئي لقيم أوزان مختلفة علماً أنه عندما تكون قيمة الوزن مساوية للواحد ($w = 1$) يصبح التوزيع توزيعاً اقتصادياً فقط أما عندما تكون قيمة الوزن مساوية للصفر ($w = 0$) يصبح توزيع الحمل توزيعاً بيئياً.



شكل (9) مقارنة التكاليف والانبعاثات لقيم أوزان مختلفة

6. الخلاصة

في هذا البحث، تم استخدام خوارزمية مستعمرة النحل الاصطناعية ABC لحل مسألة التوزيع الاقتصادي البيئي. تعتبر خوارزمية ABC إحدى تقنيات التحسين الذكية التي أصبحت مشهورة منذ السنوات القليلة الماضية والتي يمكن استخدامها لحل المسائل التحسين التوافقية المختلفة. من أجل إظهار فعالية الخوارزمية، تمت مقارنة النتائج المتحصل عليها مع التوزيع المتساوي والتوزيع العشوائي والتوزيع السعوي. تشير نتائج الاختبارات إلى أن خوارزمية ABC المقترحة فعالة للغاية في إيجاد الحل الأفضل بحسب نوع الهدف المطلوب، سواء كان توزيع الحمل اقتصادياً أو توزيع الحمل بيئياً أو توزيع اقتصادي بيئي بحسب نسبة المفاضلة بين الهدفين بناءً على رغبة صانع القرار.

7. المراجع

- [1] Zondervan, Edwin, and Ignacio E. Grossmann. "Multi-objective optimization of energy networks under demand uncertainty." *Computer Aided Chemical Engineering*. Vol. 38. Elsevier, 2016. 2319-2324.
- [2] Abu-Mouti, Fahad. "Optimal economic and environmental operation of electric power systems via modern meta-heuristic optimization algorithms." (2012).
- [3] AlRashidi, Mohammed. "Improved optimal economic and environmental operations of power systems using particle swarm optimization." (2007).
- [4] Kulkarni, AnandJayant, et al. "Introduction to optimization." *Probability Collectives: A Distributed Multi-agent System Approach for Optimization* (2015): 1-13.
- [5] Farhat, Ibrahim A. "Economic and economic-emission operation of all-thermal and hydro-thermal power generation systems using bacterial foraging optimization." (2012).
- [6] Saadat, Hadi. *Power system analysis*. Vol. 2. McGraw-hill, 1999.
- [7] Karaboga, Dervis. "Artificial bee colony algorithm." *Scholarpedia* 5.3 (2010): 6915.

- [8] Kumar, Balwant, and Dharmender Kumar. "A review on Artificial Bee Colony algorithm." *International Journal of Engineering & Technology* 2.3 (2013): 175.
- [9] Sonmez, Y. "Multi-objective environmental/economic dispatch solution with penalty factor using Artificial Bee Colony algorithm." *Scientific Research and Essays* 6.13 (2011): 2824-2831.
- [10] Miller, Bruce G. *Clean coal engineering technology*. Elsevier, 2010.
- [11] Darfoun, Mohamed. "Optimal Distributed Generation Sizing and Placement via Single-and Multi-Objective Optimization Approaches." (2013).