

**استنباط منحني القدرة المصنف من التشغيل الأمثل لمنظومة خزانات متعددة**

المهندس: عدي يوسف ذنون  
وزارة الكهرباء - المديرية العامة  
لمشاريع إنتاج الطاقة الكهربائية

د. عبد الوهاب محمد يونس  
جامعة الموصل - كلية الهندسة  
قسم الموارد المائية

**الخلاصة:**

يهدف هذا البحث إلى استنباط منحنيات القدرة الكهربائية الناتجة من التشغيل الأمثل لمنظومة خزانات متعددة تضم كلا من خزان سد بخمة وخزان سد دوكان وخزان سد مكحول، ولحالة معدل الإيراد المائي (سنة معدل)، والتي تم الحصول عليها من تصنيف السنوات لفترة (30) سنة. تم استخدام تقنية البرمجة الديناميكية التفاضلية المنفصلة لإيجاد التشغيل الأمثل للخزانات السابقة الذكر.

بعد الحصول على النتائج تم رسم منحني القدرة الكهربائية المصنف الذي يمثل العلاقة بين كل من القدرة الكهربائية المتولدة والنسبة المئوية لزمان التشغيل، تكمن أهمية هذه المنحنيات في معرفة حجم القدرة الكهربائية المتوفرة لتلك النسبة من زمن التشغيل. تبين من النتائج بأن مجموع القدرة الكهرومائية السنوية المتولدة لحالة معدل الإيراد المائي للخزانات الثلاثة هي 5228 و 1897 و 2173 (ميكاواط) لحالة التشغيل كنظام واحد و 5410 و 1604 و 2929 (ميكاواط) لحالة التشغيل المنفرد ولكل من خزان سد بخمة ودوكان ومكحول على التوالي والناتجة من تطبيق تقنية البرمجة الديناميكية التفاضلية المنفصلة، وان القدرة الكهرومائية التي يمكن ضمان توفيرها لـ 90% من زمن التشغيل كانت 309.1 و 134.08 و 140.7 (ميكاواط) لحالة التشغيل كنظام واحد و 344.91 و 107.7 و 188.18 (ميكاواط) لحالة التشغيل المنفرد لكل من خزان سد بخمة ودوكان ومكحول على التوالي.

الكلمات الدالة: خزانات متعددة ، التشغيل الأمثل ، منحني القدرة

**A prediction of Power Duration Curve from the Optimal Operation of the Multi Reservoirs System****Abstract**

This study aims of predication Power Duration Curves(PDC) resulting from the optimal operation of the multi reservoirs system which comprises the reservoirs of Bakhma dam, Dokan dam and Makhool dam for the division of years over 30 years. Discrete Differential Dynamic Programming(DDDP) has been employed to find the optimal operation of the said reservoirs.

PDC representing the relationship between the generated hydroelectric power and percentage of operation time equaled or exceeded . The importance of these curves lies in knowing the volume of electric power available for that percentage of operation time. The results have shown that the sum of yearly hydroelectric power for average Release and for the single operation was 5410,1604,2929(Mw)for the reservoirs of Bakhma, Dokan, Makhool dams, which resulted from the application of independent DDDP technology. Also, the hydroelectric power whose generation can be guaranteed for 90% of the time is 344.91,107.7,188.15 (Mw) for the single operation and 309.1,134.08,140.7 (Mw) for the operation as a one system for the reservoirs of Bakhma, Dokan, and Makhool dams respectively.

**keywords : Multi reservoirs ,Optimal operation , Power curve**

- IS** المياه المطلقة من خزان سد الموصل (م<sup>3</sup>ا<sup>ثا</sup>).  
**قائمة تعاريف الرموز:**
- K** ثابت قيمته (0.0036) إذا تم استخدام الوحدات المعرفة في المعادلة 2  
**CP1** المعدل الشهري للجريان الخارج من الخزانات الواقعة أعلى نقطة تقاطع نهر دجلة مع الزاب الأعلى، بالإضافة إلى الجريان الداخل من المساحة الواقعة بين سد بخمة والنقطة أعلاه (مليون م<sup>3</sup>).
- P** القدرة الكهرومائية المتولدة (كغم.م<sup>ا</sup>ا<sup>ثا</sup>).  
**CP2** المعدل الشهري للجريان الخارج من خزان سد دوكان بالإضافة إلى الجريان الداخل من المساحة الواقعة بين خزان سد دوكان ونقطة تقاطع نهر دجلة مع الزاب الاسفل، مضافا إليها الجريان الخارج من النقطة CP1 (مليون م<sup>3</sup>).
- Pw** القدرة الكهرومائية المتولدة (ميكاواط).  
**PDC** منحني القدرة المصنف
- S<sub>(n+1)</sub>, S<sub>(n)</sub>** كمية المياه المخزونة في الخزان في بداية ونهاية فترة التشغيل (مليون م<sup>3</sup>).  
**DDDP** البرمجة الديناميكية التفاضلية المنفصلة.
- Sp<sub>(n)</sub>** حجم الفواقد نتيجة التسرب من جسم السد (مليون م<sup>3</sup>).  
**DP** البرمجة الديناميكية.
- Q<sub>t</sub>** كمية المياه المارة خلال فتحات التوربينات (مليون م<sup>3</sup>ا<sup>ثا</sup>).  
**Evp** قيمة تمثل صافي حجم فواقد التبخر من الخزان مطروحا منها حجم المياه المضافة من الأمطار خلال فترة التشغيل (مليون م<sup>3</sup>).
- γ** الوزن النوعي للماء.  
**H** الفرق بين منسوب سطح الماء في الخزان ومنسوب سطح الماء خارج فتحة التوربينات (Downstream) (م).  
**η** كفاءة التوربينات المستخدمة في التوليد اعتمدت بحدود (0.95).
- I<sub>(n)</sub>** المعدل اليومي للمياه الداخلة إلى الخزان خلال الزمن n (مليون م<sup>3</sup>).  
**IB** المياه المطلقة من خزان سد بخمة (م<sup>3</sup>ا<sup>ثا</sup>).  
**ID** المياه المطلقة من خزان سد دوكان (م<sup>3</sup>ا<sup>ثا</sup>).  
**IM** المياه المطلقة من خزان سد مكحول (م<sup>3</sup>ا<sup>ثا</sup>).

**المقدمة:**

هيمنت الطاقة الكهربائية على سواها من أنواع الطاقات المعروفة في جميع الاستخدامات ولنواحي الحياة المتعددة، وقد أصبحت مميزات الكهرباء والتي لم يكن لها أي موقع يذكر بين مصادر الطاقة الثانوية المستخدمة عند نهاية القرن التاسع عشر في حين وصل استهلاك الطاقة الكهربائية في بداية القرن الواحد والعشرين إلى أعلى استهلاك لها من بين أنواع الطاقات المعروفة لحد الآن، لأسباب كثيرة أهمها سهولة نقلها، وتوصيلها، ونظافتها، وكفاءتها، وسهولة تحويلها إلى الأنواع الأخرى من الطاقة مثل الطاقة الحركية والضوئية، وكذلك سهولة السيطرة والتحكم بها.

أدى زيادة الطلب على الطاقة الكهربائية إلى البحث عن مصادر بديلة للوقود الأحفوري لأجل توليد الطاقة الكهربائية، وقد تم دراسة إمكانية استغلال الطاقة المائية لهذا الغرض ومنذ منتصف القرن الماضي وخاصة بعد توفر إمكانيات بناء السدود الضخمة والتي تحجز بدورها كميات تقدر بمليارات الأمتار المكعبة والتي تعتبر مصدر مستمر لتوليد الطاقة الكهربائية.

إن تشغيل الخزانات المائية يجب أن يكون مثاليا وفعالاً ليتم استغلال المياه بأفضل ما يمكن دون إضاعة أي كمية سدى، مع العلم إن أهم الصعوبات التي نواجهها في أنظمة الموارد المائية هي كيفية تشغيل وإدارة هذه الأنظمة. ونظراً للعشوائية الموجودة في هذه النظم واحتواءها على الكثير من المتغيرات والمحددات التي تكون خطية وغير خطية، ولأن غالبية المشاكل الموجودة في هذه النظم تكون على مراحل أو فترات زمنية متعاقبة، لهذا تم استخدام أحد نماذج البرمجة الديناميكية والتي تعتبر من النماذج الشائعة الاستخدام لإيجاد التشغيل الأمثل لنظم الخزين.

**موقع النظام قيد البحث:**

تشمل منظومة الخزن الواقعة تحت الدراسة كل من خزان سد بخمة وخزان سد دوكان المرتبطين على التوالي، وكما هو موضح بالشكل (1)، تم جمع المعلومات الهيدرولوجية والهيدروليكية المتعلقة بمنظومة الخزن أعلاه من عدة مصادر وكان أكثرها شمولية المصدر (1)، إن المعلومات الهيدرولوجية تصف لنا حجم المياه المتوفرة في منطقة البحث والتي ستكون المدخلات لنموذج البرمجة الديناميكية التفاضلية المنفصلة، حيث تتضمن هذه المعلومات كلا من المياه الداخلة إلى الخزان وحجم الأمطار وحجم التبخر من الخزان إضافة إلى حجم مياه التسرب من جسم السد وكافة المتطلبات والاحتياجات البيئية للمناطق الواقعة أسفل كل من خزان سد بخمة وخزان سد دوكان وخزان سد مكحول ولفترة امتدت 30 سنة

**وصف عام لعملية البرمجة الديناميكية والبرمجة الديناميكية التفاضلية المنفصلة**

البرمجة الديناميكية هي تقنية الحل الرياضي الأمثل، والغاية منها بناء سلسلة من العلاقات المرتبطة والمتشابكة للقرارات التي تحدد سير عملية التشغيل. إن عملية اتخاذ القرار للمراحل المتعددة تتحول إلى سلسلة من القرارات المفردة لاتخاذ القرار. تبدأ البرمجة الديناميكية بجزء صغير من المسألة والوصول إلى حل أمثل لهذا الجزء ثم تدريجياً يأخذ جزء آخر من هذه المسألة والوصول إلى حل نموذجي آخر مع الأخذ بنظر الاعتبار الجزء الأول، وتستمر هذه العملية إلى أن تحل المسألة على أكمل صورة ومن جميع الأوجه(2).

أما البرمجة الديناميكية التفاضلية المنفصلة فهي أسلوب للأمثلية يتضمن كل الاحتمالات المقبولة للبرمجة الديناميكية التقليدية، ولكنه يتميز بمتطلبات حسابية أقل بكثير، فعندما تحتاج مسألة

K : ثابت قيمته (0.0036) إذا تم استخدام الوحدات المعرفة أعلاه في المعادلة.

### صياغة النموذج الرياضي:

يتكون النموذج الرياضي من جزئين، هما: دالة الهدف والقيود أو المحددات المتعلقة بها، إن الهدف من عملية الأمثلية لأي نظام هي إما لتقليل الخسائر الاقتصادية نتيجة الفيضانات أو لزيادة الأرباح عن طريق تجهيز المياه للري أو لتوليد الطاقة الكهربائية، وفي هذا البحث تم تحديد دالة الهدف لتعظيم القدرة الكهرومائية المتولدة من التشغيل الأمثل للنظام. أما المحددات فهي مجموعة المعادلات التي تمثل الظروف والشروط الواجب مراعاتها عند حل المسألة أو عند تطبيق النموذج الرياضي، وقد تم التقيد بالحدود الدنيا والقصى للقيود الخاصة بالخرين والمياه المطلقة ومنسوب المياه في الخزان وأقصى توليد للمحطة الكهرومائية<sup>(4)</sup>.

إضافة إلى المحددات أعلاه تعد معادلة الاستمرارية Continuity Equation لمحددات الفيزيائية لنموذج البرمجة الديناميكية والتي تربط بين المتغيرات الداخلة والمتغيرات الخارجة للخزان، حيث تتم موازنة الكتلة على محتويات الخزان من بداية الفترة إلى نهاية الفترة (المرحلة)<sup>(5)</sup> ويعد هذا مقياس على فعالية الجريان الداخل والخارج من الخزان ويمكن أن يصاغ بالمعادلة التالية:

$$S_{(n+1)} = I_{(n)} + S_{(n)} - R_{(n)} - Evp_{(n)} - SP_{(n)} \dots \dots \dots (8)$$

حيث تمثل :

$R_{(n)}$  : المعدل اليومي لكمية المياه المطلقة من

الخزان خلال الزمن (مليون م<sup>3</sup>).

$I_{(n)}$  : المعدل اليومي لكمية المياه الداخلة إلى الخزان

خلال الزمن (مليون م<sup>3</sup>).

معقدة إلى وقت طويل للحسابات تظهر فاعلية هذا الأسلوب بشكل ملحوظ، وكما أشارت البحوث إلى إمكانيات هذه الطريقة في تجاوز كثير من العقبات التي قد تواجهنا عند تطبيق البرمجة الديناميكية التقليدية وخاصة عند وجود نموذج متعدد الخزانات<sup>(3)</sup>.

### القدرة الكهرومائية المتولدة

يعتمد التوليد الكهرومائي من الخزانات المائية على عنصرين أساسيين هما التصريف المار خلال فتحات التوربينات لمحطة التوليد ومستوى الماء في الخزان<sup>(3)</sup>، كما هو موضح من خلال المعادلة التالية:

$$P = \gamma \cdot \eta * H * Q_t \dots \dots \dots (1)$$

حيث تمثل:

P : القدرة الكهرومائية المتولدة (كجم.م<sup>3</sup>/ثا).

H : الفرق بين منسوب سطح الماء في الخزان ومنسوب سطح الماء خارج فتحة التوربينات (Downstream) (م) .

$Q_t$  : التصريف الذي يمر من خلال فتحات التوربينات (م<sup>3</sup>/ثا).

$\gamma$  : الوزن النوعي للماء.

$\eta$  : كفاءة التوربينات المستخدمة للتوليد والتي اعتمدت بحدود (0.95)،<sup>(1)</sup>.

كذلك يمكن كتابة المعادلة (1) بصيغة أخرى

وكما يلي:

$$Pw = K * H * Q_t \dots \dots \dots (2)$$

حيث تمثل:

Pw : القدرة الكهرومائية المتولدة (ميكاواط) .

$Q_t$  : حجم المياه المارة خلال فتحات التوربينات

(مليون م<sup>3</sup>).

الأمثل في حالة الربط على التوازي يزيد من قدرة هذه الخزانات على التوليد والمتمثل بخزان سد بخمة وخزان سد دوكان.

4- من الشكل (4)، نلاحظ بأن حجم القدرة الكهرومائية في حالة التشغيل المنفرد أعلى من حالة التشغيل كنظام واحد لأن هذا النوع من الربط يزيد قدرة التوليد الكهرومائي لكل خزان على حدا كما في حالة خزان سد مكحول والمربوط على التوالي مع كل من خزان سد بخمة و دوكان.

5- إن هبوط منحنى القدرة المصنف إلى أدنى مستوى له ثم ارتفاعه بعد ذلك إلى قيم أعلى يعود إلى العلاقة بين حجم الخزين في الخزان (منسوب الماء في الخزان) وتأثره بحجم المياه المطلقة من بوابات المحطة الكهرومائية والموضحة في معادلة التوليد الكهرومائي<sup>(1)</sup>.

6- يلاحظ من الشكل (5) والذي يمثل عدد الحالات المنفذة مع حجم الخزين الأمثل، بأن قيم الخزين تتناقص بشكل ملحوظ مع عدد المحاولات إلى أن تصل إلى حالة من الاستقرار في القيمة مع استمرار زيادة عدد المحاولات، أن هذا الاستقرار يدل على الوصول إلى الحالة المثلى، والتي تم الحصول عليها بعدد محاولات يصل إلى (70) محاولة.

$S_{(n+1)} \cdot S_{(n)}$ : كمية المياه المخزونة في الخزان في بداية ونهاية فترة التشغيل (مليون م<sup>3</sup>).  
 $Evp_{(n)}$ : قيمة تمثل صافي حجم فواقد التبخر من الخزان مطروحا منها حجم المياه المضافة من الأمطار خلال فترة التشغيل (مليون م<sup>3</sup>).  
 $SP_{(n)}$ : حجم الفواقد نتيجة التسرب من جسم السد (مليون م<sup>3</sup>).

تم إهمال قيم فواقد التسرب من جسم السد لعدم توفر البيانات الكافية لمنطقة الدراسة لفترة التشغيل المشار إليها سابقا.

### النتائج والمناقشة:

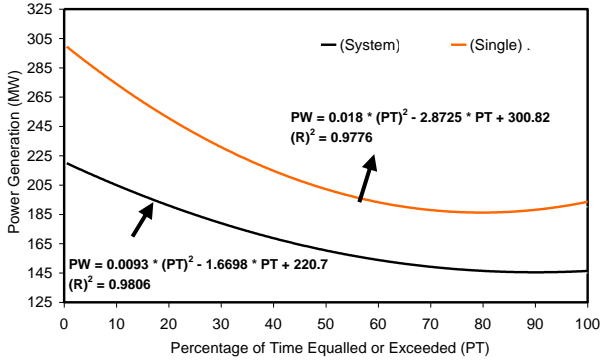
1- من التشغيل الأمثل الذي تم التوصل إليه كانت حجم القدرة الكهرومائية السنوية المتولدة لحالة معدل الإيراد المائي للخزانات الثلاثة هي 5228 و 1897 و 2173 (ميكاواط) لحالة التشغيل كنظام واحد و 5410 و 1604 و 2929 (ميكاواط) لحالة التشغيل المنفرد ولكل من خزان سد بخمة ودوكان ومكحول على التوالي.

2- من ملاحظة النتائج في الجدول (1) تم الحصول على قدرة كهرومائية آنية والتي يمكن ضمان توفيرها لـ 90% من زمن التشغيل كانت 309.1 و 134.08 و 140.7 (ميكاواط) لحالة التشغيل كنظام واحد و 344.91 و 107.7 و 188.18 (ميكاواط) لحالة التشغيل المنفرد لكل من خزان سد بخمة ودوكان ومكحول على التوالي.

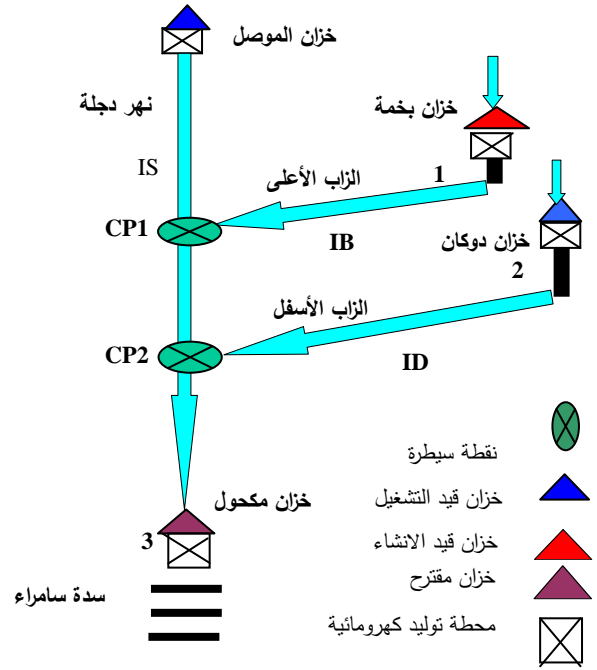
3- من الشكلين (2) و (3)، نلاحظ بأن حجم القدرة الكهرومائية المتولدة في حالة التشغيل كنظام واحد أكبر من حجم القدرة الكهرومائية المتولدة في حالة التشغيل المنفرد والسبب يعود إلى إن التشغيل

## المصادر:

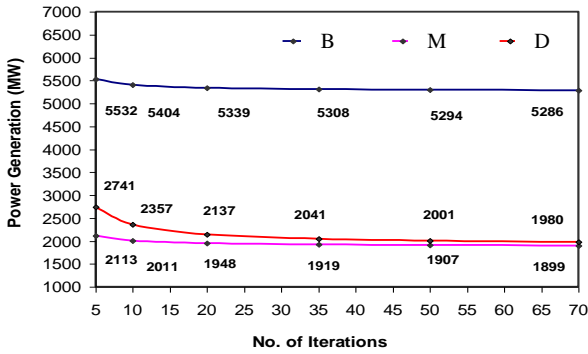
- 1- Al-Tae, O.Y., "**Optimum Operation of Multi-Reservoirs to Maximize the Hydropower Generation**", M.Sc.Thesis, University of Mosul, College of Engineering, (2006).
- 2- Ali M., "**Development of Reservoir Operating Rules With Particular Reference to The River Tees System**", Ph.D.Thesis, University of Newcastle, Upontyne, U.K., (1978).
- 3- Younis, A.M., "**Optimal Water Utilization From Tigris Basin Reservoir North of -Fatha for Hydroelectric Power Generation**", Ph.D.Thesis, University of Mosul, College of Engineering, Water Resources Department, (2002).
- 4- Heidari, M., Chow, V.T., Kokotovre, O.V., and Meredith, D.D., "**Discrete Differential Dynamic Programming Approach to Water Resources System Optimization**", Water Resources Research, Vol.7, No.2, pp.273-282, (1971).
- 5- Al-Nash, M.S., "**Real Time Daily Operation of Bekhma Dam**", M.Sc.Thesis, University of Baghdad, College of Engineering, (1992).



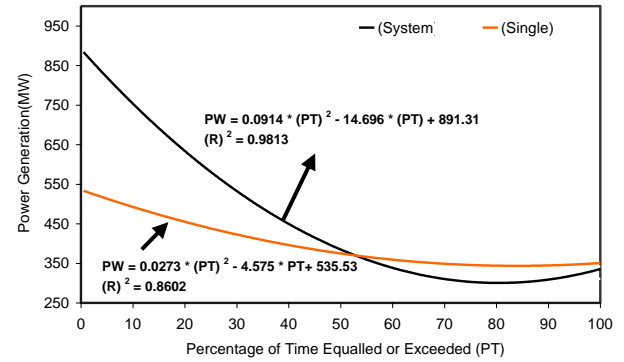
شكل(4) العلاقة بين القدرة الكهرومائية المتولدة والنسبة المئوية للزمن لمعدل الإيراد المائي من خلال منحنى القدرة المصنف(PDC)، لحالة التشغيل المنفرد والتشغيل كنظام واحد لخزان سد مكحول



شكل(1) مخطط لموقع النظام قيد الدراسة



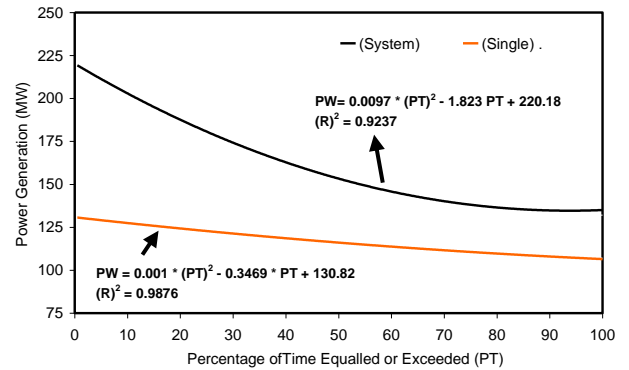
شكل (5) العلاقة بين عدد المحاولات المنفذة لاختيار الخزين الأمثل من الخزين الكلي لحالة معدل الإيراد المائي لكل من خزان سد بخمة وخزان سد دوكان وخزان سد مكحول.



شكل(2) العلاقة بين القدرة الكهرومائية المتولدة والنسبة المئوية للزمن لمعدل الإيراد المائي من خلال منحنى القدرة المصنف(PDC)، لحالة التشغيل المنفرد والتشغيل كنظام واحد لخزان سد بخمة

جدول(1) قيم التوليد الكهرومائي لنسبة 50% و 90% والتي يمكن توفيرها لتلك النسبة من زمن التشغيل، إضافة إلى حجم التوليد الكهرومائي السنوي لمنظومة الخزانات قيد البحث.

حجم التوليد الكهرومائي (ميكاواط)	النسبة المئوية للزمن	حالة التشغيل	حجم التوليد الكهرومائي		
			خزان مخول	خزان دوكان	خزان بخمة
167	50%	نظام واحد	140	134	385
2173	90%		216	124	435
216	50%	المنفرد	188	107	344
188	90%		2929	1604	5410
2929	التوليد السنوي				



شكل(3) العلاقة بين القدرة الكهرومائية المتولدة والنسبة المئوية للزمن لمعدل الإيراد المائي من خلال منحنى القدرة المصنف(PDC)، لحالة التشغيل المنفرد والتشغيل كنظام واحد لخزان سد دوكان

جدول (1) قيم التوليد الكهرومائي لنسبة 50% و 90% والتي يمكن توفيرها لتلك النسبة من زمن التشغيل، إضافة إلى حجم التوليد الكهرومائي السنوي لمنظومة الخزانات قيد البحث.

حجم التوليد الكهرومائي (ميكاواط)			النسبة المئوية للزمن	حالة التشغيل
خزان مكحول	خزان دوكان	خزان بخمة		
167.5	153.16	385.01	50%	نظام واحد
140.7	134.08	309.1	90%	
2173	1897	5228	التوليد السنوي	
216.28	124.86	435.81	50%	المنفرد
188.15	107.7	344.91	90%	
2929	1604	5410	التوليد السنوي	