# الآفاق المستقبلية للتشغيل الأمثل لخزان سد الموصل

**د. عبد الوهاب محمد يونس غزال** أستاذ مساعد
**د. تيمور عبد المجيد آوجي** مدرس
**إحسان فصيح حسن**
**قسم هندسة الموارد المائية - جامعة الموصل**

**الخلاصة**

تم في هذه الدراسة تطبيق نموذج البرمجة الديناميكية التفاضلية المنفصلة (DDDP) لتشغيل خزان سد الموصل الواقع على نهر دجلة في الجزء الشمالي من العراق. وتم تقييم النتائج المستحصلة من نموذج (DDDP) بمقارنتها مع النتائج التي تم الحصول عليها باستخدام نموذج محاكاة (SM). إن الغرض من هذه الدراسة هو إيجاد السياسات التشغيلية الشهرية المثلى الحالية والمستقبلية وللسنوات (٢٠٠٧ و ٢٠١٧ و ٢٠٢٧) للخزان قيد الدراسة من خلال تلبية المتطلبات الاروائية لمشروع ري الجزيرة واحتياجات تجهيز المياه وفق عدة حالات تشغيل مختلفة تم افتراضها خلال الدراسة وهي أولاً: تشغيل مشروع ري الجزيرة الشمالي فقط وثانياً: تشغيل مشروع ري الجزيرة الشمالي والشرقي مجتمعة وثالثاً: تشغيل مشروع ري الجزيرة الشمالي والشرقي والجنوبي مجتمعة ولحالة اقل إيراد مائي سنوي لجميع الحالات. لقد بينت النتائج وجود عجز في المياه في حالات التشغيل الثانية والثالثة وقد كان العجز بالنسبة لنموذج الامثلية موزعاً في فترات طويلة مما يساعد على تقليل الجزاءات وكان حجم الخزين يتذبذب ضمن الحدود العليا والدنيا للخزن التشغيلي، في حين لوحظ تركز العجز المائي في فترات قصيرة وانخفاض حجم الخزين دون الحد الأدنى للخزن التشغيلي في نموذج المحاكاة.

**الكلمات الدالة : البرمجة الديناميكية التفاضلية المنفصلة ، النمذجة ، الاحتياجات المائية**

# *Future Horizons For Optimal Operation of Mosul Dam Reservoir*

**Abstract**

In this study, The Discrete Differential Dynamic Programming (DDDP) has been applied to the operation of Mosul dam reservoir on Tigris river, North of Iraq. The simulation technique (SM) has been used to evaluate the results obtained from the (DDDP) model. The aim of this study is to obtain the present and future optimal monthly reservoir operation policies for the years (2007, 2017, and 2027) through fulfilling the irrigation requirements of Jazira Irrigation Project and water supply requirements according to different operation states. The states included the operation of Northern only, Northern and Eastern; and the Northern, Eastern and Southern Jazira Irrigation Projects for minimum annual inflow in all states. The results indicated water deficit occurrence with the second and third states. For optimization model, the water deficits were distributed over long periods which helped to minimize the penalty, and the reservoir storages were within the upper and lower operating storage limits. Whereas for simulation model the water deficits were concentrated within short periods and the reservoir storages declined below the lower operating storage limit.

**Keywords: Discrete Differential Dynamic Programming, Simulation, Water requirements**

**قائمة الرموز**

$Dem_{(i)}$ الاحتياجات المائية للمنطقة الواقعة أسفل الخزان خلال الشهر (i) مضافاً إليها أدنى جريان مسموح به في النهر، مليون م$^3$.

$EV_{(i)}$ معدل حجم المياه المفقودة بالتبخر من سطح الخزان خلال الشهر (i) (مليون م$^3$). $F^*$: اقل مجموع للخسائر (العائد) في الممر باستخدام معادلة المعاودة للبرمجة الديناميكية عند امثل مسار ($S_n^*$).

$F_1^*$ اقل مجموع كلي للخسائر (العائد) الناتجة من إدخال المسار التجريبي ($\acute{S}_n$).

H معدل النمو السنوي لعدد السكان.

$I_{(i)}$ معدل حجم المياه الداخلة إلى الخزان خلال الشهر (i)، مليون م$^3$.

M عدد السنوات بين تعدادين للسكان.

MF أقصى جريان مسموح به في النهر.

MOS القيمة الدنيا للخزين التشغيلي، مليون م$^3$.

$P_{(i)}$ معدل حجم المياه المضافة من الأمطار إلى سطح الخزان خلال الشهر (i)، مليون م$^3$.

Po عدد السكان في التعداد السابق.

Pr عدد السكان في التعداد اللاحق.

$R_{(i)}$ المعدل الشهري لحجم المياه المطلقة من الخزان خلال الشهر (i)، مليون م$^3$.

$RT_{(i)}$ حجم المياه المسحوبة من الخزان مباشرةً لمشاريع ري الجزيرة (الشمالي والشرقي والجنوبي) خلال الشهر (i)، مليون م$^3$.

$S_{(i)}$ حجم الخزين في الخزان بداية الشهر (i)، مليون م$^3$

$S_{(i+1)}$ حجم المياه المخزونة في الخزان نهاية الشهر (i)، مليون م$^3$.

$S_{max}$ القيمة القصوى للخزين، مليون م$^3$.

$S_{min}$ القيمة الدنيا للخزين ، مليون م$^3$.

$\acute{S}_n$ المسار الابتدائي التجريبي.

$SP_{(i)}$ معدل حجم المياه المفقودة عن طريق المسيل خلال الشهر (i) ، مليون م$^3$.

$XOS$ القيمة القصوى للخزين التشغيلي، مليون م$^3$.

**المقدمة**

تمثل المياه السطحية من أنهار وبحيرات عذبة المصدر الرئيس لمياه الري في القطر. وهذا المورد عرضة للتفاوت في الإيراد مع الزمن لذا يحتاج الأمر إلى تطوير إدارة وتشغيل منشآت الخزن والسيطرة عليها للحفاظ على ديمومة هذا المصدر. إن خزن المياه الفائضة عن الحاجة الفعلية هي إحدى الوسائل الرئيسة في إدارة الموارد المائية المتاحة والتحكم في تصريفها من خلال بناء المنشآت الهيدروليكية المناسبة مثل السدود وذلك لتوفير المتطلبات المائية للأغراض المتعددة مستقبلاً. مع استمرار زيادة السكان في العالم تزداد الحاجة إلى الغذاء، مما يتطلب زيادة الرقعة الزراعية بإمداد أجزاء إضافية من الأراضي بالمياه وبصورة منتظمة. ونظرا لأهمية الموارد المائية التي تعتبر

الدعامة الأساسية في النمو الاقتصادي لأي بلد، فان استغلالها بالشكل الأمثل ذا أهمية قصوى وخاصة بعد تعرض مصادر المياه المختلفة إلى النضوب بفعل ظاهرة الاحتباس الحراري. وعليه لابد من إدارة الموارد المائية على أسس علمية وتخطيط مبرمج لتلافي الهفوات في تشغيل المشاريع الاروائية ومن هنا جاءت أهمية دراسة التشغيل الأمثل للخزانات من اجل السيطرة وزيادة الإنتاج.

استعملت في الآونة الأخيرة نماذج عديدة في تحليل أنظمة الموارد المائية الأمثل للخزانات لتتماشى مع الأهداف المطلوبة من التشغيل، وبذلك عولجت الكثير من مشاكل الموارد المائية والتي بدورها أدت إلى زيادة الإنتاج والسيطرة بشكل جيد على

المشاريع الاروائية، ومن أهم هذه النماذج: نماذج البرمجة الخطية Linear Programming (LP)، ونماذج البرمجة غير الخطية Non-Linear Programming (NLP)، ونماذج البرمجة الديناميكية Dynamic Programming (DP)، ونماذج المحاكاة Simulation Models (SM).

**الدراسات السابقة**

تحتوي أنظمة تشغيل وإدارة الموارد المائية على نماذج وأساليب عديدة للامثلية تستخدم في حل المشاكل التي تواجه الباحثين في مجالات السيطرة على الخزين واتخاذ القرارات المثلى. فقد أجرى Yakowitz (1982) [1] مراجعة شاملة لنماذج البرمجة الديناميكية (DP) المستخدمة في حل مسائل الموارد المائية منها نموذج البرمجة الديناميكية التفاضلية (DEDP) والبرمجة الديناميكية الجزئية (Incremental DP)، مع فحص الأساليب الرياضية التي تستخدم لإيجاد الحلول لهذه المسائل. ومن بين المسائل التي تمت دراستها السيطرة على نظم الري وتحليل وتشغيل الخزانات وإدارة وتطوير مشاريع الري. بعدها قام Yeh (1985) [2] بعرض معظم تقنيات تحليل النظم وخصائص كل منها وتطبيقاتها لغرض الوصول إلى الإدارة المثلى لأنظمة الخزن وذلك باشتقاق السياسات التشغيلية تحت ظروف تشغيلية مختلفة.

تستخدم البرمجة الديناميكية التقليدية (DP) لإيجاد أفضل سياسة تشغيل لأنظمة الخزن المتعددة الوحدات والأغراض بصورة عامة. ولكن هذه الطريقة بشكل عام تواجه مشكلتين كبيرتين تقيدان تطبيقها في المسائل المعقدة وهما الحاجة إلى حواسيب ذات ذاكرة كبيرة والحاجة الى فترة زمنية طويلة لإتمام الحسابات الرياضية المتعلقة بالمسألة قيد البحث. للتغلب على هذه المشكلة يتم استخدام طريقة البرمجة الديناميكية التفاضلية المنفصلة (DDDP) وهي طريقة رياضية لإيجاد الحل الأمثل بمتطلبات حسابية قليلة، وذاكرة حاسوب صغيرة (Fadhil, 1990)[3].

استخدم Saleh (1989) [4] أسلوب البرمجة الديناميكية التفاضلية المنفصلة (DDDP) لإيجاد أفضل سياسة تشغيل للخزانات المائية الواقعة على نهر الفرات وتطوير نموذج المحاكاة في تهذيب مياه بحيرة الحبانيّة للسيطرة على الفيضانات وتحلية مياه البحيرة وخلطه باستمرار اعتمادا على النسبة المعتمدة في الموازنة المائية. بينما استخدم Fadhil (1990) [3] تقنية (DDDP) لغرض الحصول على امثل إطلاق شهري للمياه من الخزانات الواقعة على نهر دجلة وروافده والمتمثلة بخزان سد الموصل وبخمة ودوكان ليفي بالاحتياجات المائية الشهرية دون تجاوز الحدود الدنيا والعليا للسعة التصميمية للخزان وبأقل الخسائر الممكنة. واستخدم Al-Gazzal (2001) [5] و الطائي (2006) [6] البرمجة الديناميكية التفاضلية المنفصلة (DDDP) في دراستين منفصلتين على مجموعة السدود الواقعة ضمن حوض نهر دجلة شمال منطقة الفتحة (الموصل وبخمة ودوكان ومكحول) بهدف الحصول على اكبر قدر ممكن من الطاقة الكهربائية.

**خطوات عملية البرمجة الديناميكية التفاضلية المنفصلة**

**اختيار المسار الابتدائي التجريبي Initial Trial Trajectory**

تبدأ عملية (DDDP) أولاً باختيار المسار الابتدائي التجريبي وهو أول تقريب إلى المسار الأمثل، والمسار هو سلسلة من التحويلات (Transformations) لمتجه الحالة من بداية الفترة إلى نهايتها خلال عملية تحليل النظام. ويكون المسار مثالياً إذا كان يفي بجميع المحددات المفروضة على النظام ويجعل النظام اقرب ما يكون إلى الهدف. إن الفكرة الأساسية وراء اختيار المسار الابتدائي التجريبي هو البحث عن المسار الأمثل خلال المنطقة التي يتوقع أن يقع فيها المسار الأمثل.

ويمكن تقدير المسار الابتدائي التجريبي إما من الخبرة الهندسية التي تعتمد على توفر المعلومات الهيدرولوجية والمعلومات التي تتعلق بطريقة تصرف النظام، أو من خلال تقسيم النظام إلى عدد من الأنظمة الثانوية (Subsystems) للحصول على امثل مسار مستقل لكل نظام ثانوي واعتبار هذه المسارات المثلى تقريبا هي امثل مسار للنظام الأصلي. كما يمكن تقدير المسار الابتدائي من خلال الاعتماد على العلاقات الرياضية التي توصل إليها الباحثون من خلال أبحاثهم في هذا المجال ومنهم (Heidari et al, 1971)[7] الذين اقترحوا العلاقة الآتية لإيجاد المسار الابتدائي التجريبي:

$$\acute{S}_n = (S_{max} - S_{min})/2 + S_{min} \quad \ldots\ldots\ldots (1)$$

حيث تمثل:

$\acute{S}_n$: المسار الابتدائي التجريبي.

$S_{max}$: القيمة القصوى للخزين (مليون م$^3$).

$S_{min}$: القيمة الدنيا للخزين (مليون م$^3$).

## إنشاء الممر Construction of the Corridor

بعد اختيار المسار الابتدائي التجريبي فان الخطوة التالية هي عملية إنشاء الممر الذي يحيط بالمسار الابتدائي التجريبي. إن بناء الممر عملية مهمة لتحديد الحدود القصوى والدنيا لقيم متغيرات الحالة التي تستخدم محددات لإيجاد الحل الامثل للنموذج قيد البحث. وهناك نقطتان يجب أخذهما بنظر الاعتبار لتحديد الممر:

**أولا:** اختيار العرض الابتدائي للممر.

**ثانيا:** بناء الممر الذي يحيط بالمسار التجريبي (Trial Trajectory).

إن عرض الممر يكون ثابتا خلال الدورة الواحدة ويتغير عند الانتقال من دورة إلى أخرى. من الممكن أن نحدد نصف عرض الممر عن طريق تحديد قيمة (Delta) لأول دورة من المعادلة الآتية (السعدي، 1999)[8]:

$$Delta = (S_{max} - S_{min}) / X \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (2)$$

حيث تمثل:

Delta اكبر انحراف مسموح به عن المسار الابتدائي.

X: الثابت الذي يحدد لنا أول زيادة لقيمة (Delta) وقد حدده (Ali, 1978) [9] بمقدار (8) لان هذا الرقم يعطي اقل عدد ممكن من المحاولات واقل وقت ممكن للحاسبة للتوصل إلى المسار الامثل.

يتكون الممر من ثلاث متجهات لقيم متغير الحالة في المسار التجريبي. يكون الممر غير متناظر في العرض إذا تعدى احد حدود الممر كما هو موضح في الشكل (1) وحسب المعادلة الآتية (Heidari et al, 1971)[7]:

$$S_n = \begin{cases} \acute{S}_n + Delta \\ \acute{S}_n \\ \acute{S}_n - Delta \end{cases}$$

$$n = 1, 2, \ldots, N \quad \ldots\ldots\ldots (3)$$

$$S_n = \acute{S}_n + (Z - 2) * Delta \quad \ldots\ldots\ldots (4)$$

حيث تمثل:

Z = الاعداد (١ و ٢ و ٣)

## الاختيار الأمثل خلال الممر Optimization Inside a Corridor

إن عملية البحث عن المسار الامثل داخل حدود الممر يتم عن طريق عملية التكرار لمعادلة البرمجة الديناميكية التقليدية، إن حل معادلة البرمجة الديناميكية يعطينا امثل قيمة لدالة الهدف (Objective Function) من خلال الحل الجبري للبرمجة الديناميكية ذات الاتجاه المناسب (أمامي أو خلفي) إن عملية البحث عن المسار الأمثل تستمر إلى أن تصل إلى المسار الأمثل التي تحدد

قيمته حسب مقياس التقارب المحدد مسبقا في النموذج (Fadhil, 1990) [3].

**فحص التقارب: Test for Convergence**

بعد استخدام متغيرات الحالة ($S_n$) لإيجاد أدنى مجموع للخسائر ($F^*$) (Minimum Total Penalty) داخل الممر باستخدام المعادلة التكرارية للبرمجة الديناميكية وبعد حساب المسار الأمثل ($S_n^*$). فان الخطوة التالية هي مقياس التقارب، وتمثل مجموعة من الشروط والمحددات لغرض الوصول إلى قرار ينهي عملية الحسابات. ويمكن كتابة خطوات عملية فحص التقارب بالشكل الآتي:

١. إذا كانت $|F^* - F_1^*| > \lambda$ ، اذهب إلى الخطوة الثانية، واذا كانت $Delta > \gamma$ وكانت $|F^* - F_1^*| \le \lambda$ فان Delta=Delta/2 ثم اذهب إلى الخطوة الثانية وإذا كانت $Delta \le \gamma$ أوقف المحاولات.

٢. اجعل $F_1^* = F^*$ و $\acute{S}_n = S_n^*$

بعدها يتم بناء ممر جديد وإيجاد المسار الأمثل مع العائد خلال الممر الجديد وبعدها نعيد الخطوة (١).

حيث تمثل:

$\gamma$، $\lambda$ : ثوابت تستخدم في فحص التقارب

$F_1^*$ : اقل مجموع كلي للخسائر (العائد) الناتجة من إدخال المسار التجريبي ($\acute{S}_n$).

$F^*$: اقل مجموع للخسائر (العائد) في الممر باستخدام معادلة المعاودة للبرمجة الديناميكية عند امثل مسار ($S_n^*$).

**مفهوم المحاكاة**

إن للمحاكاة مفاهيم متعددة ولكنها تؤدي إلى هدف واحد، فقد عرف (Hufschmidt and Fiering, 1966) [10] المحاكاة بأنها أسلوب لوصف سلوك النظام تحت تأثير مدخلات معينة عندما يتم تشغيله بمجموعة من الإجراءات الدقيقة. وهي تعتمد على أسلوب المحاولة والخطأ التي تحاول إيجاد صورة طبق الأصل من النظام الحقيقي دون المساس بالنظام الحقيقي نفسه. في حين عرف (Revelle, 1999) [11] المحاكاة بأنها تشغيل اصطناعي مكرر لنظام واقعي معين. والمحاكاة تقيّم السياسات والتصاميم البديلة وتعدل بعض المظاهر البيئية، مثل الاطلاقة الثابتة أو سعة الخزان أو ربما نسبة الاطلاقة في الحالة التي لا يمكن أن تسلم فيها الكمية الكاملة لتجهيز المياه بالمقارنة مع الامثلية التي تحدد بعض السياسات والتصاميم المثلى. إن المحاكاة لا تحقق امثل سياسة لتصميم وتشغيل النظام ولكنها وسيلة ممتازة لتقييم البدائل التي تم الحصول عليها من نماذج الامثلية(Louks et al. 1981) [12] .

إن تطبيق النمذجة في تحليل النظم لإدارة وتخطيط الموارد المائية بدأت بوحدات مهندسي الجيش الأمريكي في (1953) حيث تم تطبيقها على نهر ميسوري. بعدها توالت الدراسات المستخدمة لهذه التقنية فقد درس Garudkar (1991) [13] إمكانية إنشاء خزان لتجهيز الماء ومتطلبات الري باستخدام نموذج محاكاة (SM)، حيث بيّنت الدراسة أهمية استخدام نماذج المحاكاة في التخطيط وتنمية الموارد المائية مستقبلاً. وربط Mohanty (1994) [14] بين نماذج المحاكاة ونماذج الامثلية المتمثلة بالبرمجة الديناميكية (DP) والبرمجة الخطية (LP) في تخطيط وتشغيل مشروع (Upper Indravati) المتعدد الأغراض المكون من أربعة خزانات والواقع في ولاية (Orissa) الهندية. بينما استخدم Ishaq (1998) [15] نموذج محاكاة (SM) لغرض تقييم التشغيل الأمثل الذي تم التوصل إليه من تطبيق نموذج البرمجة الديناميكية التفاضلية المنفصلة (DDDP) لإيجاد أفضل سياسة تشغيل شهرية للخزانات الواقعة على نهري دجلة والفرات في العراق،

وذلك لتلبية كافة المتطلبات المائية وفق المحددات المثبتة مسبقا وبأقل الخسائر الممكنة، حيث أشارت النتائج النهائية إلى كفاءة سياسة التشغيل المثلى فضلاً عن تقليل العجز في الخزين إلى اقل ما يمكن. واقترح Ngo (2006) [16] طريقة لتغيير سياسة التشغيل التقليدية لخزان (Hoa Binh) الواقع في حوض نهر الأحمر بفيتنام، إلى استراتيجيات تشغيلية مثلى بالاعتماد على الأساليب الرياضية المتطورة. حيث تم تطوير هيكل يربط بين نموذج المحاكاة (SM) وطريقة بحث عددية لإيجاد متغيرات القرار المثلى التي تحدد تشغيل الخزان. وأظهرت النتائج تحسناً ملحوظاً في أداء الخزان من ناحية إنتاج الطاقة مع الاحتفاظ بمعامل الأمان ضد الفيضانات و تلبية المتطلبات المائية.

**منطقة الدراسة**

يتكون هذا النظام من خزان سد الموصل والمشاريع الأروائية المرتبطة بها والمتمثلة بمشاريع ري الجزيرة الشمالي والجنوبي والشرقي. ويمثل الشكل (2) المخطط التفصيلي لهذا للنظام.

**البيانات المستخدمة في البحث:**

تشمل هذه البيانات المعلومات الهيدروليكية والهيدرولوجية والطبوغرافية والمناخية والاحتياجات المائية للمنطقة قيد الدراسة. تم جمع هذه البيا
من بعض الدوائر المختصة ومن البحوث والدرا
السابقة. وتتضمن هذه المعلومات كميات المياه الداخلة إلى الخزان والأمطار والتبخر وحجم الخزين والاحتياجات المائية للري وتجهيز المياه والاحتياجات البيئية والتي تمثل جميعها مدخلات (Inputs) لنموذج البرمجة الديناميكية التفاضلية المنفصلة (DDDP) ونموذج المحاكاة (SM) وهي كما يأتي:

**البيانات الهيدرولوجية**

وتشمل الجريان الشهري الطبيعي الداخل إلى خزان سد الموصل لمدة (50) سنة، والأمطار والتبخر حيث أن معظم الأمطار الساقطة على منطقة الدراسة تمتد للفترة من شهر تشرين الأول إلى شهر مايس ويكون توزيع الأمطار متفاوتاً على طول هذه الفترة.

**الاحتياجات المائية الحالية والمستقبلية**

لاستثمار مصادر المياه بصورة صحيحة وفعالة لابد من تحديد الاحتياجات المختلفة الحالية والمستقبلية من المياه وذلك من اجل المحافظة على هذه الثروة المائية من الضياع هدراً من جهة وتامين المتطلبات المائية في أوقات الجفاف من جهة أخرى. تقسم الاحتياجات المائية المسحوبة من خزان سد الموصل إلى صنفين: احتياجات المياه لأغراض الري والاستعمالات السياحية والملاحة وتربية الأسماك والأحياء المائية (In Stream Uses)، حيث إن الاحتياجات المائية للري تمثل المياه المسحوبة مباشرة من الخزان. وتتركز الاحتياجات الحالية للري بمتطلبات مشروع ري الجزيرة الشمالي والتي تم تحديدها اعتماداً على أقصى سعة للقناة الرئيسة والبالغة (45) م$^3$/ثا. أما الاحتياجات المستقبلية للري فتشمل متطلبات مشروع ري الجزيرة الشمالي مع مشروعي ري الجزيرة الشرقي والجنوبي المقترحين وللأعوام (٢٠١٧ و ٢٠٢٧) وقد تم تحديد هذه المتطلبات أيضاً اعتماداً على أقصى سعة للقنوات الرئيسة البالغة (60) م$^3$/ثا و (125)م$^3$/ثا لمشروع ري الجزيرة الشرقي والجنوبي على التوالي. وتبلغ المتطلبات الاروائية السنوية لمشروع ري الجزيرة الشمالي والشرقي والجنوبي (1400) و(1866) و(3888) مليون م$^3$ على التوالي.

أما النوع الآخر من الاحتياجات فهي تجهيز المياه للاستعمالات المنزلية والاحتياجات التجارية والصناعية من الاطلاقات أسفل الخزان (Off Stream Uses). هنالك عدة تقديرات لمعدل استهلاك المياه للأغراض المنزلية والصناعية والتجارية

منها الذي قامت به مديرية ماء نينوى والتي حددت حصة الفرد الحضري بـ(500) لتر/يوم والريفي بـ(300) لتر/ يوم والمعدل العام للفرد على مستوى المحافظة بـ(400) لتر/ يوم آخذين بنظر الاعتبار الاستعمالات المنزلية والصناعية والخدمات العامة والحكومية وضائعات الشبكة، حيث تم اعتماد الرقم الأخير لتقدير حصة الفرد في هذا البحث. لاشك أن تقدير الاحتياجات المستقبلية للمياه يعتمد بالأساس على عوامل طبيعية وبشرية تتمثل في توزيع الموارد المائية، وعدد سكان المنطقة ونسبة نموهم. أن تقدير الحجم السكاني المتوقع في المستقبل هو من المتغيرات المهمة لغرض تقدير متطلبات المنطقة وحاجتها المستقبلية من المياه. تدل الإحصائيات على أن عدد سكان محافظة نينوى قد بلغ (١.٤٤٤.٠٨٥) نسمة حسب إحصائية عام (1987)، ثم ارتفع إلى (٢.٠٤٦.٢٩٩) نسمة حسب إحصائية عام (1997) (الجبوري، 2006) [17].

هناك طرق عديدة لتقدير الحجم السكاني باستخدام النماذج الرياضية منها: النموذج الحسابي البسيط والهندسي والأُسّي. ولتقدير الحجم السكاني للمنطقة قيد الدراسة تم اختيار النموذج الهندسي لبساطته وإعطائه نتائج مقاربة في الدقة مع النموذج الأسي. ويفترض أن معدل النمو يكون خاضع للتغير السنوي المركب (أي أن الزيادة في السنة الأولى تضاف إلى الأصل مكوناً زيادة أعلى في السنة التالية) ولتقدير حجم السكان بهذه الطريقة نحتاج إلى نتائج دقيقة لتعدادين سكانيين لإيجاد معدل النمو السنوي وباستخدام الصيغة الآتية:

$$h = \sqrt[m]{\frac{P_r}{P_o}} \qquad \text{.....(5)}$$

تم إيجاد عدد السكان بعد n من السنوات باستخدام الصيغة الآتية (الشلقاني، 1999) [18]:

$$P_r = P_o (1+h)^m \qquad \text{.....(6)}$$

حيث تمثل:

$P_r$: عدد السكان في التعداد اللاحق.

$P_o$: عدد السكان في التعداد السابق.

h: معدل النمو السنوي.

m: عدد السنوات بين التعدادين.

على ضوء ما تقدم تم اعتماد نسبة الزيادة السنوية في استهلاك المياه لسكان منطقة الدراسة في تقدير الاحتياجات المائية الحالية والمستقبلية للاستعمالات المختلفة للمناطق الواقعة أسفل خزان سد الموصل قيد الدراسة كما مبين من خلال الجدول (1). أما الجدول (2) فيبين الاحتياجات المائية الكلية السنوية من خزان سد الموصل ( الاحتياجات أسفل الخزان زائداً المتطلبات الاروائية السنوية لمشاريع ري الجزيرة).

## صياغة نموذج البرمجة الديناميكية التفاضلية المنفصلة (DDDP)

يعرف النموذج الرياضي في مسائل البرمجة الديناميكية (DP) بأنه عبارة عن مجموعة من العلاقات الرياضية التي تصف مشكلة معينة، والتي غالباً ما تكون على نوعين: نوع يصف لنا دالة الهدف (Objective Function) والنوع الأخر يصف لنا القيود (Constraints). والفقرات التالية توضح كيفية التعبير عن هذه العلاقات الرياضية.

### دالة الهدف Objective function

تعتبر دالة الهدف مقياسا لفعالية أو أمثلية الحل المقترح للمشكلة. إن الهدف من عملية الامثلية (Optimization) لأي نظام هو لتقليل الخسائر الاقتصادية الناجمة عن النقص الحاصل في تجهيز المياه أو عن الفيضانات أو زيادة الأرباح عن طريق تجهيز المياه لأغراض الري والمتطلبات الأخرى. في هذه الدراسة تم تحديد دالة الهدف لإيجاد أفضل سياسة تشغيل حالية ومستقبلية لخزان سد الموصل

وذلك من خلال تلبية الاحتياجات المائية للأغراض المختلفة وبأقل الجزاءات الممكنة وبالشكل الآتي:

$$Min.Penalty = \sum_{i=1}^{N} \left[ Loss\{R_{(i)}\} + Loss\{S_{(i+1)}\} \right]$$

.....(٧)

واستخدمت المعادلات الآتية لتعريف دالة الخسائر الناتجة من الاطلاقات:

$$Loss\{R_{(i)}\} = a(R_{(i)} - Dem_{(i)})^2 \quad \text{If } R_{(i)} < Dem_{(i)}$$

$$Loss\{R_{(i)}\} = 0 \quad \text{If } Dem_{(i)} \le R_{(i)} \le MF$$

$$Loss\{R_{(i)}\} = b(R_{(i)} - MF)^2 \quad \text{If } R_{(i)} > MF$$

حيث تمثل:

$S_{(i+1)}$: حجم المياه المخزونة في الخزان نهاية الشهر (i) (مليون م$^3$).

$R_{(i)}$: المعدل الشهري لحجم المياه المطلقة من الخزان خلال الشهر (i) (مليون م$^3$).

$Dem_{(i)}$: الاحتياجات المائية للمنطقة الواقعة أسفل الخزان خلال الشهر (i) مضافاً إليها أدنى جريان مسموح به في النهر (مليون م$^3$).

$MF$: أقصى جريان مسموح به في النهر.

$a, b$: ثوابت تعتمد على احتمالية كون الاطلاقة اقل من الاحتياجات الفعلية أو أعلى من أقصى جريان مسموح به (Fadhil, 1990) [3].

واستخدمت المعادلات الآتية لتعريف دالة الخسائر الناجمة من الخزن النهائي:

$$Loss\{S_{(i+1)}\} = c(S_{(i+1)} - MOS)^2 \quad \text{If } S_{(i+1)} < MOS$$

$$Loss\{S_{(i+1)}\} = 0 \quad \text{If } MOS \le S_{(i+1)} \le XOS$$

$$Loss\{S_{(i+1)}\} = d(S_{(i+1)} - XOS)^2 \quad S_{(i+1)} > XOS$$

حيث تمثل:

$MOS$: القيمة الدنيا للخزين التشغيلي (مليون م$^3$).

$XOS$: القيمة القصوى للخزين التشغيلي (مليون م$^3$).

$c, d$: ثوابت تعتمد على احتمالية كون الخزين نهاية الشهر (i) اقل من أدنى أو أعلى من أقصى خزين تشغيلي (Fadhil, 1990) [3].

**المحددات Constraints**

هناك الكثير من المحددات الفيزيائية التي يجب أخذها بنظر الاعتبار كقيود في البرمجة الديناميكية (DP) وفيما يأتي أهم تلك المحددات بالنسبة للمسألة قيد الدراسة:

أولاً: معادلة الاستمرارية (Continuity Equation)، التي تمثل دالة التحويل في البرمجة الديناميكية. وهي مقدار الموازنة بين محتويات الخزان من بداية الفترة الحالية والفترة التي تليها والتي يمكن التعبير عنها بالصيغة الرياضية الآتية:

$$R_{(i)} = I_{(i)} + S_{(i)} + P_{(i)} - EV_{(i)} - S_{(i+1)} - RT_{(i)} - SP_{(i)}$$

..... (٨)

ثانياً: محدد المياه المطلقة: إن مقدار الاطلاقات المائية (متغير القرار) خلال أية فترة من فترات التشغيل يجب أن يقع ضمن مديات محددة من القيم ويمكن التعبير عنها كالآتي:

$$Dem_{(i)} \le R_{(i)} \le MF \quad \text{..... (٩)}$$

ثالثاً: محدد الخزين: يمكن التعبير عن محدد الخزين (متغير الحالة) بالعلاقة الآتية:

$$S_{\min} \le S_{(i+1)} \le S_{\max} \quad \text{..... (١٠)}$$

حيث تمثل:

$EV_{(i)}$: معدل حجم المياه المفقودة بالتبخر من سطح الخزان خلال الشهر (i) (مليون م$^3$).

$P_{(i)}$: معدل حجم المياه المضافة من الأمطار إلى سطح الخزان خلال الشهر (i) (مليون م$^3$).

$I_{(i)}$ : معدل حجم المياه الداخلة إلى الخزان خلال الشهر (i) (مليون م$^3$).

$RT_{(i)}$ : حجم المياه المسحوبة من الخزان مباشرةً لمشاريع ري الجزيرة (الشمالي والشرقي والجنوبي) خلال الشهر (i) (مليون م$^3$).

$SP_{(i)}$ : معدل حجم المياه المفقودة عن طريق المسيل خلال الشهر (i) (مليون م$^3$).

$S_{(i)}$ : حجم الخزين في الخزان بداية الشهر (i) (مليون م$^3$).

**صياغة نموذج المحاكاة (SM)**

تم في هذه الدراسة تطوير وإعادة صياغة برنامج حاسوبي لنموذج محاكاة مكتوب بلغة فورتران على أساس شهري باستخدام طريقة (SOP) Standard Operating Policy لفحص وتقييم نتائج التشغيل الأمثل لخزان سد الموصل باستخدام نموذج (DDDP). ونموذج المحاكاة هذا قائم على أساس حساب موازنة الكتلة لتتبع حركة المياه خلال النظام مع تبني حالات مختلفة لتطبيق النموذج. تتلخص طريقة (SOP) في تشغيل الخزانات في أن الخزان يقوم بتلبية الاحتياجات بشكل كامل عندما يكون هنالك خزين أكبر أو يساوي الطلب في فترة معينة، وعندما يكون الخزين أقل من الطلب يقوم الخزان بإطلاق كل الخزين (Loucks et al., 1981) [12].

**تشغيل الخزان Reservoir operation**

تم تشغيل الخزان تحت المحددات الأساسية الآتية:

١. حجم المياه المطلقة خلال الفترة الزمنية لا يتجاوز محتويات الخزان في بداية الشهر زائداً المياه الداخلة إلى الخزان عند الفترة الزمنية نفسها أي أن:

$$R_{(i)} \le S_{(i)} + I_{(i)} + P_{(i)} - EV_{(i)} - RT_{(i)} - S_{\min} - SP_{(i)} \quad (11)$$

ومعادلة الموازنة المائية للخزان تأخذ الصيغة المذكورة في معادلة (٨).

٢. محتويات الخزان عند أي فترة زمنية لا تتجاوز سعة الخزان وكذلك لا تقل عن أقل سعة للخزان Dead Storage (معادلة ١٠).

**مناقشة نتائج نموذج (DDDP)**

والفقرات الآتية تبين وصفاً لحالات التشغيل التي اعتمدت في البحث.

الحالة الأولى:

تضمنت هذه الحالة تشغيل النظام قيد الدراسة لتلبية المتطلبات الاروائية الكاملة لمشروع ري الجزيرة الشمالي فقط للسنوات (٢٠٠٧ و ٢٠١٧ و ٢٠٢٧) وبافتراض حصول فترات جفاف لمدة سنة واحدة لبيانات التصاريف المعتمدة في الدراسة. الأشكال من (3) إلى (5) توضح السياسات التشغيلية المثلى لسنة واحدة حيث لم يلاحظ فيها حصول أي عجز مائي.

الحالة الثانية:

تتضمن تشغيل نظام الخزن مع تلبية المتطلبات الاروائية الكاملة لمشاريع ري الجزيرة الشمالي والشرقي مجتمعةً للسنتين (٢٠١٧ و ٢٠٢٧) بافتراض حصول فترات جفاف لسنة واحدة. ففي الشكلين (6) و (7) التي تمثل السياسات التشغيلية المثلى وفق هذه الحالة كان حجم العجز السنوي (966) و(1707) مليون م$^3$ على التوالي وكان أعلى عجز مائي متركزاً في كل من أشهر أيلول من سنة (2017) وحزيران من سنة 2027 والذي يشكل بدوره ٣٠% و٢٣% من العجز الكلي على التوالي ويرجع السبب في ذلك إلى أن الاحتياجات المائية الشهرية كانت اكبر من الجريان الشهري الداخل إلى الخزان.

الحالة الثالثة:

وتتضمن تشغيل نظام الخزن مع تلبية المتطلبات الاروائية الكاملة لمشاريع ري الجزيرة الشمالي والشرقي والجنوبي مجتمعة للسنتين (٢٠١٧ و ٢٠٢٧) بافتراض حصول فترات جفاف لسنة واحدة والمتمثلة بالشكلين (8) و (9) حيث كان حجم العجز السنوي (1903) و (3641) مليون م$^3$ على التوالي

وكان أعلى عجز مائي متركزاً في كل من أشهر حزيران من سنة (2017) وأيلول من سنة (2027) والذي يشكل بدوره (٢٥%) و (١٩%) من العجز الكلي على التوالي.

**مناقشة نتائج نموذج المحاكاة (SM)**

الحالة الأولى:

تم تشغيل نموذج المحاكاة لنفس الفترات التشغيلية للحالة الأولى لنموذج (DDDP) عند تشغيل مشروع ري الجزيرة الشمالي فقط وتم توضيح هذه النتائج في الأشكال من (10) إلى (12)، حيث لم يلاحظ فيها حصول أي عجز مائي.

الحالة الثانية:

يبين الشكلان (13) و (14) نتائج نموذج المحاكاة لنفس الفترات التشغيلية للحالة الثانية لنموذج (DDDP) حيث لم يلاحظ فيها حصول أي عجز مائي.

الحالة الثالثة:

يمثل الشكلان (15) و (16) نتائج تشغيل نموذج المحاكاة للسنتين (٢٠١٧ و ٢٠٢٧) ٢٦ التوالي ولنفس الفترات التشغيلية للحالة الثالثة لنموذج (DDDP). يلاحظ في هذه الأشكال أن حجم الخزين قد انخفض دون الحد الأدنى للخزين التشغيلي وكان اكبر انخفاض له يبلغ (1262) و(3205) مليون م$^3$ خلال أشهر أيلول للسنتين (٢٠١٧ و ٢٠٢٧) على التوالي وان العجز كان مركزاً على فترات قصيرة حيث كان اكبر عجز يبلغ (384) مليون م$^3$ خلال شهر أيلول من سنة (2027)، في حين كان العجز موزعاً على فترات طويلة وحجم الخزين كان يتغير ضمن الحدود العليا والدنيا للخزن التشغيلي في نموذج (DDDP) وللحالة نفسها والذي يتوافق مع القانون الوقائي Hedging Rule المذكور من قبل (Olivera and Loucks, 1997) [19] الذي ينص على أنه في حالة شحه كميات المياه الواردة إلى الخزان فأنه من الأفضل الاحتفاظ بالمياه وقبول العجز القليل الحاصل في التجهيز وذلك لغرض تقليل احتمالية حدوث عجز اكبر في المستقبل.

**الاستنتاجات**

١. يمكن القول أن تقنية البرمجة الديناميكية التفاضلية المنفصلة تصلح إلى حد بعيد لإيجاد السياسات التشغيلية المثلى لأنظمة خزن معقدة حيث تقل كفاءة التقنيات التقليدية الأخرى خاصة عندما تكون دوال الهدف والمحددات أو أحداهما ذات طبيعة غير خطية، فضلاً عن اختصارها لوقت تشغيل الحاسبة الالكترونية واحتياجها إلى ذاكرة حاسبة صغيرة.

٢. إن نماذج المحاكاة لا تحقق أمثل سياسة تشغيل ولكنها تقنية جيدة لتقييم النتائج التي يتم الحصول عليها من نماذج الامثلية لأنها تبين مدى نجاح أو فشل هذه النماذج في تشغيل أنظمة الموارد المائية فضلاً عن بساطتها الرياضية.

٣. بينت الدراسة أن اكبر احتياج مائي سنوي كلي للمنطقة قيد الدراسة بلغ (14552) و (16767) مليون م$^3$ للسنوات (٢٠١٧ و ٢٠٢٧) على التوالي بسبب زيادة عدد السكان وتشغيل مشاريع ري الجزيرة الشرقي والجنوبي.

٤. بلغ أقصى عجز سنوي باستخدام موديل DDDP عند تشغيل لمشاريع ري الجزيرة الشمالي والشرقي والجنوبي مجتمعة للسنتين (٢٠١٧ و ٢٠٢٧) بافتراض حصول فترات جفاف لسنة واحدة (1903) و (3641) مليون م$^3$ على التوالي وكان أعلى عجز شهري متركزاً في كل من أشهر حزيران من سنة (2017) وأيلول من سنة (2027) والذي يشكل بدوره (٢٥%) و(١٩%) من العجز الكلي على التوالي. أما عند استخدام موديل SM لتشغيل الخزان لنفس الحالة المذكورة فان حجم الخزين قد