



ISSN: 1813-162X (Print) ; 2312-7589 (Online)

Tikrit Journal of Engineering Sciences

available online at: <http://www.tj-es.com>

TJES
Tikrit Journal of
Engineering Sciences

Al-Taiee ThM, Mustafa MS. Hydrodynamic Simulation of Flood Due to Hypothetical Momentary Mosul Dam Failure . *Tikrit Journal of Engineering Sciences* 2020; 27(4): 48- 57.

Thair M. Al-Taiee ¹ *

Mustafa S. Mustafa ²

¹Dams & Water Resources Department/
Engineering College/ Mosul University/
Mosul

²Dams & Water Resources Research
Center / Mosul University

Hydrodynamic Simulation of Flood Due to Hypothetical Momentary Mosul Dam Failure

A B S T R A C T

Flood wave simulation due to hypothetical momentary failure of Mosul Dam was carried out by applying the (IBER) hydrodynamic model for the dam storage scenarios (300, 310, 320, 330 and 335) meter above sea level after testing the validity and calibration the model to identify areas that will be inundated between dam site and south Mosul City. Flood waves simulation maps representing borders, water levels and depths were drawn. The inundated areas for between dam site and north Mosul city were determined for the mentioned storage scenarios are (69.14, 114.76, 158.2, 202.5 and 245.6) km² respectively.

The minimum and maximum percentage of the inundated area within Mosul City was also calculated to be (25.6-54.6) % respectively out of the total city area. The maximum flood wave discharges at the failed dam breach and at Mosul City due to the worst dam storage scenario (335) m a.s.l are (781132 and 337138) m³/s respectively. While the elapsed travel time for maximum discharge reaching Mosul City is (4.18) hours from the initiation of dam failure. The maximum flood depth within Mosul City is (36.7) m occurred after (4.68) hours.

Finally, the routing percentage occurred in the maximum flooding discharge (attenuation) between dam site and Mosul City for storage scenario (335) meters is 56.8% while the lag time was (4.03) hours.

Keywords:

(IBER) Model; instantaneous failure; Mosul Dam; Finite volume; inundation.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 07 Dec. 2019
Accepted 10 May 2020
Available online 01 July 2020

© 2019 TJES, College of Engineering, Tikrit University

DOI: <http://dx.doi.org/10.25130/tjes.27.4.06>

محاكاة هيدروديناميكية للفيضان الناتج عن الانهيار الافتراضي اللحظي لسد الموصل

مصطفى سالم مصطفى / قسم السدود والموارد المائية / كلية الهندسة / جامعة الموصل / العراق
ثائر محمود الطائي / قسم السدود والموارد المائية / كلية الهندسة / جامعة الموصل / العراق
الخلاصة

أجريت عملية محاكاة لموجة الفيضان الناتجة عن الانهيار الافتراضي اللحظي لسد الموصل بتطبيق نموذج (IBER) الهيدروديناميكي لسيناريوهات منسوب خزن في بحيرة السد (300، 310، 320، 330 و335) متراً فوق مستوى سطح البحر بعد اختبار صلاحية النموذج ومعايرته للتعرف على المناطق التي ستغمرها موجة الفيضان الناتجة عن الانهيار وللمناطق ابتداءً من موقع السد حتى جنوب مدينة الموصل. رسمت خرائط غمر الفيضان والتي تمثل حدود ومناسيب واعماق الفيضان وسيناريوهات الخزن المذكورة حيث قدرت مساحات الأراضي المغمورة ضمن هذا المقطع من النهر بين موقع سد الموصل وشمال مدينة الموصل والتي استنتجت من خرائط الغمر التي تمت محاكاة موجاتها الفيضانية بـ (69.14، 114.76، 158.2، 202.5 و245.6) كم² على التوالي. بينما بلغت أدنى وأقصى نسبة للمساحة التي ستغمرها موجة الفيضان في مدينة الموصل المغمورة لأدنى وأقصى سيناريو خزن بين (25.6-54.6) % من مساحة مدينة الموصل على التوالي. كما بلغ أقصى تصريف لموجة الفيضان عند فتحة الانهيار وعند مدينة الموصل ولأسوأ سيناريو خزن (335) متراً بلغ

* Corresponding author: E-mail : msmafr@uomosul.edu.iq

(781132 و 337138) م³/ثانية على التوالي وان الزمن الذي تستغرقه اقصى قيمة لموجة فيضان للوصول الى مدينة الموصل عند هذا المنسوب هو (4.18) ساعة من بدء انهيار السد. اما اقصى عمق فيضاني داخل مدينة الموصل ولأسوأ منسوب خزني فقد بلغ (36.7) متراً بعد مرور زمن مقداره (4.68) ساعة من بدء انهيار السد. أخيراً بلغت قيمة نسبة الاستتباع (attenuation) الحاصل في اقصى تصريف فيضاني بين موقع السد ومدينة الموصل لسيناريو خزن (335) متراً 56.8% بينما بلغت قيمة زمن التأخير (lag time) لأقصى تصريف فيضاني بين الموقعين (4.03) ساعة.

الكلمات الدالة: نموذج (IBER); الانهيار اللحظي; سد الموصل; الحجم المحدد; مناطق الغمر.

1- المقدمة

(Iberian Peninsula) المشتركة بين اسبانيا والبرتغال تنمينا للجهد المشترك وتم تحديث امكانياته في المحاكاة واطراف تعديلات عليه ضمن الاصدار الاخير (V2.5.2) سنة 2020 [1].

أجرى الباحثان [2] محاكاة لفيضان نهر دجلة نتيجة الانهيار الافتراضي لسد الموصل. استخدم الباحثان النموذج الحاسوبي (Simplified Dam Break Model SMPDBM) للمحاكاة لعدة سيناريوهات خزن في خزان سد الموصل. درس الباحثون [3] اهمية زمن التحذير الذي يسبق حصول كارثة الانهيار في سدي (Batman) و (Seyhan) في تركيا والذي يعتبر عامل اساسي في عمليات الاخلاء للسكان في مؤخر السدود المنهارة. استخدم الباحثون برنامج (HEC-RAS) لحساب خواص الفتحة (Breach) التي ستحصل في السدين بالإضافة الى سرعة وعمق الجريان في المناطق المغمورة، كما رسمت خرائط تمثل المساحات التي غمرتها المياه وتم تسقيط هذه المساحات على (Google Earth) لتحديد المدن والقرى التي ستغمر بالمياه. أجرى الباحثون [4] تحليل ثنائي الابعاد للفيضان الناتج من انهيار سد (Chipmbe) في الموزمبيق باستخدام البرنامج الحاسوبي (IBER) لبناء النموذج وتحليل الفيضان الحاصل وبيان مدى تأثير المناطق الواقعة في مؤخر السد من هذا الفيضان. اظهرت نتائج التحليل خرائط توضح المناطق المغمورة بالمياه وكذلك سرعة انتقال موجة الفيضان الى مسافة 36 كم على طول مجرى النهر في مؤخر السد. اجريت تحاليل الحساسية على معامل الخشونة (معامل ماننك) الذي بدوره يسمح بتقييم اللاتكديه (Uncertainty) في هذا التحليل والذي بدوره يعطي مديات لأقصى تصريف وسرعة موجة الفيضان. حلل الباحثون [5] معاملات الفتحة (Breach parameters) التي تتكون في جسم السد اثناء حدوث الانهيار ومدى تأثير هذه المعلمات على هيدروغراف الفيضان الناتج عن انهيار سد الموصل واستخدم الباحثون خمس طرائق لتخمين معاملات الفتحة المتكونة في جسم السد وهي طريقة سنك وسنورسن 1982 وطريقة ماك دونالد ولانكريج مونبوليس 1984 وطريقة دائرة الاستصلاح الامريكية 1988 وطريقة فون ثون وجيليت 1990 وطريقة فرويليتش 2008، استخدم الباحثون نموذج (HEC-RAS) لاستنتاج هيدروغراف الفيضان الناتج من الفتحة في السد للطرائق الخمس إضافة الى تحليل الحساسية على الهيدروغراف الناتج من الانهيار وذلك بتغيير معاملات الفتحة وبيان مدى تأثيرها على اقصى تصريف ناتج. قام الباحثون [6] بإنشاء نموذج حاسوبي باستخدام برنامج (MIKE 21) لمحاكاة انهيار سد كونكريتي قوسي مقام على نهر (Pihe) في الصين. تم دراسة امتداد تأثير انهيار السد بوجود خزان (Foziling) على المناطق الموجودة مؤخر السد للمناطق الواقعة على النهر. رسمت خرائط توضح مواقع الخطر الناتجة عن الفيضان لفترات زمنية مختلفة بعد حدوث الانهيار في السد باستخدام نظم المعلومات الجغرافية (GIS). تم تخمين عدد المدن والقرى التي ستواجه خطر انهيار السد حيث قدرت عدد المنازل بـ (270000) منزل وعدد الأشخاص (996000) شخص بالإضافة الى خسائر مالية كبيرة في المجالات الزراعية والصناعية والبنى التحتية.

2- وصف منطقة الدراسة (Study Area Description)

يعد سد الموصل الذي تم إنشاؤه في محافظة نينوى على نهر دجلة من أكبر السدود في العراق ويبعد 50 كم شمال مدينة الموصل و 80 كم عن الحدود مع تركيا وسوريا [7]. تمتد منطقة الدراسة الحالية على طول مجرى نهر دجلة من سد الموصل والى جنوب مدينة الموصل. تعتبر المناطق المحصورة بين سد الموصل ومدينة الموصل من الأراضي الزراعية الخصبة التي تشتهر بوفرة انتاجها الزراعي ويوجد فيها الكثير من القرى والمجمعات السكنية المتفرقة المنتشرة بين هذه الأراضي الزراعية. اما مدينة الموصل فيغلب عليها الطابع الحضري والتخطيط العمراني المتحضر مقارنة بالقرى الواقعة شمالها. الشكل (1) يوضح حدود منطقة الدراسة.

3- الهدف من البحث (Aim of the research)

أنشأ سد الموصل شمال مدينة الموصل التي تضم ما يقارب (160000) نسمة [8] موزعين على جانبي مدينة الموصل الأيمن

تعتبر السدود من المشاريع الإستراتيجية المهمة للبلدان لما تقدمه من خدمات كبيرة للمناطق التي تنشأ عليها من ناحية درء مخاطر فيضان الانهار وتوليد الطاقة الكهربائية واستخدام المياه المخزونة للزراعة والسياحة والملاحة. مثلما للسدود هذه الجوانب الايجابية الا انها تعتبر بمثابة قنبلة موقوتة يمكن ان تنفجر في اي لحظة لأسباب عديدة ولذا يمكن القول ان السدود الكبيرة تعتبر من المشاريع التي ليس من السهولة البت في الموافقة على انشاءها خاصة قرب المدن الأهلة بالسكان لما لها من تأثيرات سلبية على حياة البشر والبنى التحتية لهذه المدن وكذلك النظام الاجتماعي والبيئي للمناطق والمساحات التي تقع مؤخر هذه السدود لما تحدثه من آثار مدمرة و كارثية لهذه المناطق فيما لو حدث فيها انهيار لأسباب عديدة.

هناك الكثير من الاسباب التي تؤدي الى حدوث فشل في السدود، منها الزلازل العنيفة التي قد تحدث في المنطقة التي ينشأ فيها السد والذي يؤدي الى حدوث تشققات او تميع (Liquefaction) في جسم السد، كما يمكن ان يحدث الفشل في السدود نتيجة عبور المياه من فوق جسم السد (Overtopping) نتيجة دخول موجات فيضانية كبيرة الى خزان السد ويعجز عن استيعابها وامرارها بأمان من قبل المسيل المائي مما يؤدي الى عبور هذه الكميات من المياه من فوق جسم السد، إضافة الى ان اي خلل تصميمي او تنفيذي قد يؤدي الى حدوث تسرب خلال جسم السد او حدوث انزلاقات للميول الجانبية لجسم السد الذي قد يكون سببا لانهياره، او قد يكون بسبب وجود ضعف في اساس السد ناتجة عن وجود صخور قابلة للذوبان في الماء مثل الصخور الجبسية كما هو الحال في سد الموصل او هناك مشاكل جيوتكنيكية والتي تؤدي الى حدوث هطول في جسم السد. ونتيجة للأسباب التي ذكرت أعلاه فان أي فشل يحصل في السد سوف يؤدي الى حدوث فتحة او فتحات (Breach) في جسم السد والتي ستعمل على تمرير تصريف مفاجئة وكبيرة جدا للمياه المخزونة امام السد تكون مدمرة للمناطق الواقعة في مؤخره خاصة عندما تكون هذه الكميات من المياه المخزونة كبيرة. يعتمد هيدروغراف التصريف الخارجة من هذه الفتحة على عدة عوامل منها تتعلق ببعض خصائص السد كحجم خزان السد والسبب الذي أدى لحصول الفشل في السد، إضافة الى خصائص الفتحة التي حدثت في جسم السد كابعاد الفتحة الجيومترية وكذلك الزمن الذي يستغرق لتكون الفتحة ناهيك عن عمق الماء الموجود في الخزان.

تعد دراسات فشل السدود ورسم خرائط غمر الفيضان من الأمور الرئيسية لإدارة كارثة الفيضان لوضع خطط الطوارئ ولتمكين السلطات المختصة من توفير استجابة سريعة وفعالة لغرض تقليل الخسائر البشرية بالدرجة الاساسية التي ستحدث بعد حصول الفشل في السد. وتعتبر نماذج الفيضانات العددية (Numerical Flood Models) من التطبيقات المهمة في إدارة كوارث الفيضان والتي عادة تستخدم لتقييم الأثار المدمرة الناتجة من تقدم موجة الفيضان مؤخر السدود ورسم خرائط غمر مياهها. كما انها توفر بعض المعلمات (parameters) عن الفيضان كعمق الفيضان وسرعة موجة الفيضان في المناطق المغمورة، كما يمكن ان يستنبط منها بعض المعلمات مثل قوة التدفق والشدة (& flow force intensity) التي يمكن استخدامها لتقييم الأضرار المحتملة على السكان والبنى التحتية.

هناك العديد من النماذج الحاسوبية المستخدمة لمحاكاة سيناريوهات انهيار السدود والتي تحتاج الى بيانات خاصة لتحليلها ومن أبرز هذه النماذج المستخدمة نموذج (HEC-RAS) المستخدم من قبل فيلق المهندسين في الجيش الأمريكي ونموذج (MIKE DHI 1D & 2D) ونموذج (Simplified Dam Break Model SMPDBK) الذي طوره مؤسسة خدمة الطقس الوطنية الامريكية (National Weather Service) ومؤخر النموذج الحاسوبي الهيدروديناميكي (IBER) والذي تمكنت جامعة كورونا في اسبانيا من ايجاد اول اصدار من هذا النموذج (V1) سنة 2010 بمشاركة فريق بحثي مشترك من اسبانيا والبرتغال واطلقت هذه التسمية على هذا البرنامج نسبة الى شبه الجزيرة الايبيرية

والايسر. يعتبر سد الموصل حسب التصنيفات العالمية المعتمدة من السدود الكبيرة [9]، لذا فان أي فشل يحدث في السد سيعرض السكان الذين يشغلون هذه المنطقة الى خطر كبير خصوصا ان سد الموصل يعاني ومنذ تشغيله من مشكلة الذوبان المستمر للصخور الجبسية والانهدرابيت الموجودة في اساساته والنتيجة من خزن المياه في السد. ونتيجة لهذا الذوبان المستمر لهذه الصخور فقد اوصت الجهة الاستشارية للسد على ضرورة القيام بأعمال التحشيبية الدورية المستمرة بمادة الاسمنت لتقوية الاساسات طيلة عمر السد الافتراضي.

يهدف البحث محاكاة موجة فيضان نهر دجلة الحاصل من سيناريو الانهيار اللحظي الافتراضي لسد الموصل وبيان مدى تأثيرها للمناطق الواقعة مؤخر سد الموصل انتهاءً جنوب مدينة الموصل. اعتمدت فرضية

والايسر. يعتبر سد الموصل حسب التصنيفات العالمية المعتمدة من السدود الكبيرة [9]، لذا فان أي فشل يحدث في السد سيعرض السكان الذين يشغلون هذه المنطقة الى خطر كبير خصوصا ان سد الموصل يعاني ومنذ تشغيله من مشكلة الذوبان المستمر للصخور الجبسية والانهدرابيت الموجودة في اساساته والنتيجة من خزن المياه في السد. ونتيجة لهذا الذوبان المستمر لهذه الصخور فقد اوصت الجهة الاستشارية للسد على ضرورة القيام بأعمال التحشيبية الدورية المستمرة بمادة الاسمنت لتقوية الاساسات طيلة عمر السد الافتراضي.

يهدف البحث محاكاة موجة فيضان نهر دجلة الحاصل من سيناريو الانهيار اللحظي الافتراضي لسد الموصل وبيان مدى تأثيرها للمناطق الواقعة مؤخر سد الموصل انتهاءً جنوب مدينة الموصل. اعتمدت فرضية



الشكل 1. حوض منطقة الدراسة.



الشكل 2. مخطط يوضح المنطقة التي تتركز فيها اعمال التحشيبية ضمن اساسات سد الموصل [10]

(1) ومعادلات حفظ الزخم معادلة (3&2) [11] لمحاكاة موجة فيضان نهر دجلة نتيجة الانهيار اللحظي الافتراضي لسد الموصل.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial q_x}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{q_x^2}{h} + g * \frac{h^2}{2} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q_x q_y}{h} \right) = gh(S_{0x} - S_{fx}) \quad (2)$$

4- منهجية العمل (Methodology)

4-1-النموذج الحاسوبي (Computer Model)

اعتمد نموذج (IBER) الهيدروديناميكي الثنائي الابعاد في هذا البحث وهو من النماذج العددية الحديثة المستخدمة لمحاكاة الجريان السطحي غير المستقر بالاعتماد على معادلات سانت فينانت (Sant Venant equations) ثنائية الابعاد المبنية على معادلة حفظ الكتلة معادلة

طريقة الحجم المحدد (Finite Volume) لحل معادلة سانت فينانت. يتم تقسيم المنطقة المدروسة في طريقة الحجم المحدد الى شبكة من خلايا بأبعاد مناسبة يتم اختيارها ومن ثم تحسب قيم عمق الجريان والسرعة في مراكز هذه الخلايا حيث تمثل هذه القيمة معدل العمق والسرعة لكامل الخلية.

توجد أكثر من طريقة للحل الرياضي للحجوم المحددة منها طريقة المركز (Centered Scheme) حيث يتم إيجاد قيم السرعة والعمق للخلية المحددة والموضحة باللون الأحمر في الشكل (3) [12] باعتماد القيم السابقة واللاحقة (n_i & n_{i+1}) لقيم السرعة والعمق الموجودة في الخلايا المجاورة (x_i & x_{i+1})، ومن مساوي هذه الطريقة عدم استقراره نتائجها. اما الطريقة الأخرى فهي طريقة التحرك نحو الامام (Upwind Scheme) في هذه الطريقة وهي من نوع معادلات المرتبة الأولى (First order) يتم حساب قيم السرعة والعمق للخلية ($n_{(i+1)/2}$) بالاعتماد على القيم الموجودة في الخلية السابقة (n_i) دون الاخذ بنظر الاعتبار القيم الموجودة في الخلية اللاحقة (n_{i+1}) وتكون هذه الطريقة مستقرة حسابيا ولكنها تحتاج الى حجم خلايا صغيرة للحصول على نتائج دقيقة. اما إذا كانت قيم السرعة والعمق للخلية ($n_{(i+1)/2}$) تعتمد على المعلومات الموجودة في الخليتين السابقتين (n_{i-1} & n_i) فيكون هذا التحليل من المرتبة الثانية (Second Order) حيث تكون النتائج باستخدام هذه الطريقة أكثر دقة من المرتبة الأولى ولكنها أقل استقراره من الناحية الحسابية إضافة الى انها تحتاج الى وقت أكثر لإكمال حساباتها. الشكل (3) يوضح الالية المستخدمة في الحسابات للطرائق المذكورة أعلاه. استخدم في هذا البحث طريقة التحرك نحو الامام (Upwind Scheme) من المرتبة الأولى لحساب قيم السرعة والعمق في الخلايا وذلك لاستقراره الطريقة حسابيا إضافة الى كبر مساحة منطقة الدراسة والتي تحتاج الى وقت كبير للحسابات فيما إذا ما استخدمت المرتبة الثانية في التحليل.

$$\frac{\partial q_y}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{q_x q_y}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q_y^2}{h} + g * \frac{h^2}{2} \right) = gh(S_{0y} - S_{fy}) \quad (3)$$

حيث ان:

q_x : تصريف النهر في اتجاه المحور (x) م³/ثانية لكل 1 متر عرض النهر.

q_y : تصريف النهر في اتجاه المحور (y) م³/ثانية لكل 1 متر عرض النهر.

h: عمق الماء في النهر (م)

g: التعجيل الأرضي (م/ثانية²)

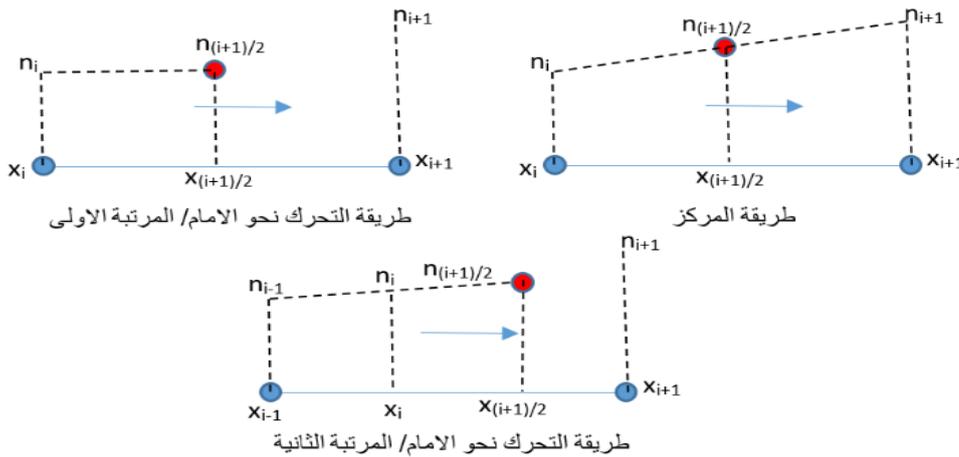
S_{0x} : ميل قعر النهر في اتجاه المحور (x).

S_{0y} : ميل قعر النهر في اتجاه المحور (y).

S_{fx} : ميل خط الطاقة في اتجاه المحور (x).

S_{fy} : ميل خط الطاقة في اتجاه المحور (y).

يمثل (IBER) مجموعة من البرمجيات الهندسية المصممة لمحاكاة الجريان السطحي غير المستقر-المضطرب (- Unsteady Turbulent) خلال جريان المياه الضحلة ويعمل هذا النموذج الهيدروديناميكي على حساب معدل اعماق خطوط الفيضان باستخدام معادلة سانت فينانت ثنائية الأبعاد (2D Saint-Venant Equations). يعتمد نموذج (IBER) في حساباته في حل هذه المعادلة والتي تعتبر من المعادلات التي ليس لها حل تحليلي رياضي باستخدام الطرائق العددية. يوجد عدد من الطرائق العددية لحل هذه المعادلة مثل طريقة الحجم المحدد (Finite Element) وطريقة العنصر المحدد (Finite Volume) وطريقة الفرق المحدد (Finite Difference). يستخدم نموذج (IBER)



الشكل 3. طرق حل الحجوم المحددة [12]

طرائق لتخمين ابعاد الفتحة والزمن اللازم لتكونها من قبل العديد من الباحثين بعد القيام بتحليل إحصائية حول ابعاد الفتحات المتكونة في السدود المنهارة والوقت الذي استغرقته لتكونها، واستنتجت علاقات رياضية وضعية عن هذه الإحصائيات لتخمين ابعاد وزمن تكون الفتحات ومن اهم هذه المعادلات طريقة (Singh & Snorrason 1984) [15] وطريقة Bureau of (McDonald & Langridge 1984) [16] وطريقة (Von Thun & Gillette 1988) [17] وطريقة (Froehlich 2008) [18].

افترض في هذا البحث ان يكون انهيار سد الموصل من النوع اللحظي يحدث في يوم اعتيادي شمس (Sunny day instantaneous failure) ونتيجة لهبوط وتميع جزء من جسم السد بشكل لحظي ومفاجئ وبطول (540) متر والذي يمثل عرض فتحة الانهيار (Breach) وهي المنطقة الحرجة التي تتركز فيها اعمال التحشبة المستمرة في جسم السد (الشكل 2) وبافتراض الشكل المستطيل للفتحة وحدثها بشكل لحظي وخلال فترة زمنية مقدارها (60) ثانية.

4-4 نموذج المنسوب الرقمي (Digital Elevation Model)

(DEM)

يعتبر نموذج المنسوب الرقمي (DEM) صورة نقطية ويمثل طوبوغرافية سطح الأرض، كل نقطة في هذا النموذج تحتوي على احداثيات خاصة بالاعتماد على خطوط الطول والعرض والتي تمثل موقع

2-4 وصف سد الموصل (Mosul Dam Description)

يعتبر سد الموصل من مشاريع الموارد المائية الإستراتيجية الكبيرة والمهمة للعراق، تم الانتهاء من إنشائه عام 1985. الغاية الأساسية من إنشائه هو لدرء مخاطر فيضان نهر دجلة وتوليد الطاقة الكهربائية والارواء وتوفير خزير إستراتيجي من المياه للقطر خلال فصل الصيف إضافة الى ذلك استخدام موقع السد كمشروع سياحي.

يعتبر سد الموصل من السدود الترابية الاملائية (Earth fill Embankment Dams)، يحتوي في مركزه على لب (core) طيني محاط باملاءات ترابية ويبلغ طوله 3600م وارتفاعه (105) م، الميول الجانبية للسد هو (V:H 1:2.5) لمقدم السد ولمؤخره، أقصى منسوب تشغيلي للسد هو 330 م فوق مستوى سطح البحر وبحجم خزير مائي قدره 11.1 مليار متر مكعب وأدنى منسوب تشغيلي للسد هو 300 م فوق مستوى سطح البحر وبحجم خزير مائي قدره 2.95 مليار متر مكعب (الشكل 4) مخطط يوضح العلاقة بين منسوب الخزن لبحيرة السد مع حجم الخزن عند كل منسوب [13]. والشكل (5) يمثل مقطع عرضي لسد الموصل [14].

3-4 معلمات الفتحة (Breach's Parameters)

تعتبر خصائص الفتحة المتكونة في جسم السد من المعلمات الرئيسية التي على أساسها يتم استنباع موجة الفيضان الناتجة من انهيار السد، ومن اهم هذه المعلمات هي ابعاد الفتحة الجيومترية وزمن تكونها. استنتجت عدة

الى خلايا غير منتظمة الشكل (Unstructured) وبأبعاد (50) متراً حيث تضمنت الطريقة الأولى اختبار حفظ الكتلة (Mass conservation) حيث تم تمرير تصريف ثابت مقداره 500 م³/ثانية عند بداية مجرى النهر عند موقع السد وباقتراض ان النهر بحالة جافة قبل امرار هذا التصريف وقد استغرقت موجة الجريان (44) ساعة للوصول الى نهاية مقطع مجرى النهر جنوب مدينة الموصل، بينما استقر مقدار التصريف (500) م³/ثانية في هذه المنطقة بعد مرور زمن مقداره (73.7) ساعة منذ بدء الجريان من بداية مجرى مقطع النهر قيد الدراسة وبذلك تم التحقيق من شرط تساوي التصريف الداخلى والخارج في النموذج.

اما الاختبار الثاني فقد تم اجراؤه بتمرير تصريف يومية مسجلة مطلقاً من سد الموصل خلال شهر نيسان 1988 حيث كانت التصريف في ذلك الشهر عالية. ادخلت هذه التصريف الى النموذج وأجريت عملية المحاكاة عليها واستنتجت أعماق ومناسيب المياه الناتجة وأجريت مقارنتها مع النتائج المسجلة. توجد في مدينة الموصل محطة رصد لقياس تصريف نهر دجلة قرب الجسر القديم في وسط مدينة الموصل وقد سجلت هذه المحطة اعلى منسوب لنهر دجلة خلال ذلك الشهر وكان قيمته (217) متراً فوق مستوى سطح البحر [22] وبالمقابل بلغت قيمة اقصى منسوب لهذا التصريف نتيجة المحاكاة الحاسوبية (216.77) متراً فوق مستوى سطح البحر وبهذا تكون قيمة معدل مربعات الأخطاء (Mean Square Error) (MSE) هي (0.0529) والتي تعتبر قيمة جيدة احصائياً واعطت مؤشراً على امكانياته وصلاحيته النموذج (IBER) في محاكاة موجة الفيضان الناتجة عن انهيار سد الموصل اللحظي.

4-7 الشروط الأولية والمحيطية للنموذج (Initial & Boundary Condition)

تعتبر الشروط الأولية والمحيطية من المدخلات الأساسية للنموذج الحاسوبي والتي على ضوئها تجري عملية المحاكاة للمسألة المراد تحليلها. تمثل الشروط الأولية (Initial condition) ظروف النموذج قبل بدء عملية المحاكاة من حيث أعماق او مناسيب المياه في جميع أجزاء منطقة الدراسة. عند محاكاة مسألة انهيار السد تتكون الشروط الأولية من جزئين الأول حجم الخزين المائي في السد والثاني عمق الماء في بقية منطقة الدراسة مؤخر السد. استخدمت عدة سيناريوهات حجم خزن في السد للمحاكاة وكما موضحة في الجدول (1) [2]، اما عمق الماء في مؤخر السد فقد تم افتراضه يساوي صفراً باعتبار ان الأرض جافة ولا يوجد فيها أي مياه على السطح. اما الشروط المحيطية (Boundary condition) فتمثل حدود تغذية المياه الداخلة الى منطقة الدراسة وحدود التصريف الخارج منها أثناء المحاكاة. يعتبر الهيدروغراف الناتج من حدوث الفتحة (Breach) في جسم السد المصدر الوحيد للتغذية بالمياه لمنطقة الدراسة والجزء الجنوبي لمدينة الموصل هو الجزء الوحيد لتصريف المياه الخارجة.

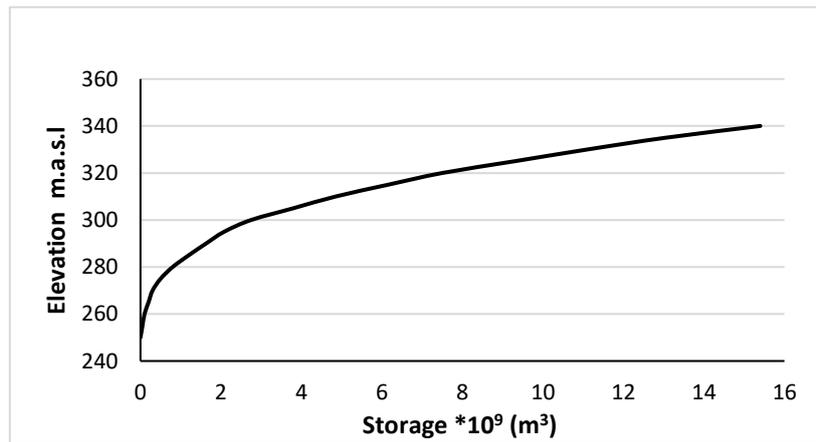
النقطة الدقيقة على سطح الأرض إضافة الى منسوب هذه النقطة بالنسبة لمستوى سطح البحر. استخدم في هذا البحث نموذج (DEM) بدقة 30متر حيث تم الحصول على هذا النموذج من وحدة المسح الجيولوجي الأمريكي (USGS) محدثة بتاريخ أيلول 2014 [20]. كما يجدر الإشارة ان نموذج (IBER) الهيدروديناميكي له الامكانية على التعامل مع نماذج التضاريس الرقمية (Digital Terrain Model DTM)، من مميزات هذه النماذج انها تأخذ بنظر الاعتبار جميع التضاريس الموجودة على السطح من حيث وجود النباتات والمنازل والعوارض وجميع البنى التحتية المختلفة والتضاريس الطبيعية لذا تكون النتائج التي يتم الحصول عليها باستخدام هذا النوع من النماذج الرقمية (DTM) أكثر دقة من النماذج الرقمية (DEM) الذي يعتبر الأرض عبارة عن ارض جرداء (Bare Land). غير ان النماذج الرقمية من نوع (DTM) ليست متاحة بشكل سهل وتعتبر نماذج ذات كلفة عالية لذا فقد تم الاستعاضة عنها بالنموذج (DEM) في المحاكاة.

4-5 معامل ماننك للخشونة (Manning Roughness Coefficient)

يعتبر معامل ماننك للخشونة من المدخلات الأساسية للنموذج الحاسوبي (IBER) وعلى أساسه تتحدد سرعة انتقال موجة الفيضان ومدى اتساع مناطق الغمر. استخدمت قيمة معامل الخشونة لمجرى النهر (0.03) ولضفاف النهر (0.04) [13, 2] وبالنسبة للأراضي الزراعية (0.06) وللغابات (0.12) [21]، اما بالنسبة للمناطق المأهولة بالسكان داخل مدينة الموصل والقرى التي تقع شمالها فقد تراوحت قيمة معامل ماننك المستخدمة من قبل الباحثين [13, 2] بين (0.1) و(0.4) على التوالي، اختيرت قيمة معامل الخشونة في هذه الدراسة لهذه المناطق (0.2) كقيمة وسطية تقع بين القيمتين المستخدمتين من قبل الباحثين المذكورين.

4-6 صلاحية النموذج الحاسوبي (Model Validation)

تعتبر عملية التحقق من صلاحية النموذج الحاسوبي المستخدم في محاكاة انتقال موجة الفيضان من الخطوات الأساسية لاي نموذج رقمي والتي على أساسها يتم اتخاذ قرار في الاعتماد على النتائج التي تم الحصول عليها من النموذج او رفضها. لذا يتوجب ان تتوفر بيانات تمثل القيم الحقيقية المقاسة من أعماق او مناسيب إضافة الى الزمن الذي استغرقه الفيضان للوصول الى مناطق الغمر بعد حدوث الانهيار ومقارنتها مع النتائج التي تم الحصول عليها من المحاكاة للوصول الى نتائج معايرة دقيقة تحاكي الظروف الحقيقية لمنطقة الدراسة. لذا لا يمكن التحقق من صلاحية هذه النماذج بشكل دقيق الا بعد حصول الفيضان الحقيقي ومعرفة نتائجه من أعماق ومناسيب وتصريف وهذا الذي طبق على سيناريو انهيار سد الموصل الافتراضي اللحظي حيث يفترض حصول انهيار حقيقي للسد وتقدم موجة الفيضان وغمرها للمناطق الواقعة مؤخره. لذلك فقد اختبر نموذج (IBER) الحاسوبي بطريقتين بعد ان تم تقسيم الخلايا في النموذج



الشكل 4. مخطط يوضح العلاقة بين منسوب الخزن وحجم الخزين المائي [13].

نموذج المناسيب الرقمية (DEM) لمنطقة الدراسة. استخدمت عدة سيناريوهات خزن في بحيرة سد الموصل لمحاكاة موجة الفيضان التي ستحدث وكما مبينة في الجدول (1).

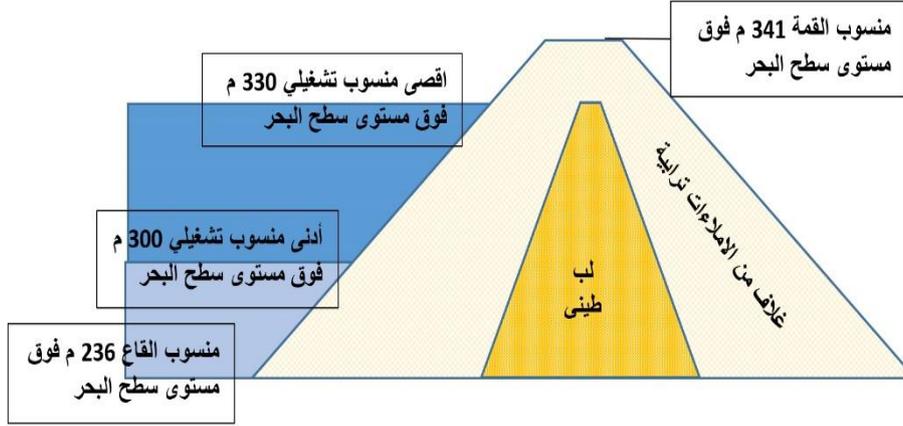
استنتجت عدة مخططات نتيجة محاكاة موجة الفيضان لجميع مناسيب الخزن المقترحة ابتداءً من سد الموصل والى جنوب مدينة الموصل على طول مجرى النهر منها اقصى تصريف لموجة الفيضان واقصى منسوب فيضاني واقصى عمق فيضاني إضافة الى الزمن الذي تستغرقه موجة الفيضان للوصول الى مختلف المناطق وكما موضحة بالأشكال (6)، (7)، (8)، (9). تراوح الزمن الذي تستغرقه موجة الفيضان للوصول الى مدينة

5- نمذجة موجة الفيضان باستخدام نموذج (IBER Flood) (Wave Modelling Using IBER)

أجريت عدة عمليات نمذجة ومحاكاة لموجة الفيضان التي حدث نتيجة الانهيار الافتراضي اللحظي للسد بعد تزويد النموذج ببيانات الإدخال (Input data) اللازمة وهي حجم الخزين المائي في البحيرة وابعاد الفتحة والمتمثل بعرض الفتحة الافتراضي والذي قدره (540) متراً وارتفاع الفتحة والمتمثل بالمسافة بين منسوب قعر الفتحة (250) متراً ومنسوب الخزين في السد وزمن تكونها في جسم السد ومعامل الخشونة حسب المنطقة المشغولة على طول مجرى النهر لمنطقة الدراسة إضافة الى

رُسم هيدروغراف الفيضان الناتج من هذا الانهيار اللحظي للسد لجميع السيناريوهات وعلى طول مجرى نهر دجلة والشكل (10) يوضح هيدروغراف الفيضان الحاصل عند فتحة الانهيار لسد الموصل ومدخل مدينة الموصل عند منسوب خزن (335) م مقدار التخفيض (Attenuation) الحاصل في قيمة اقصى تصريف (Q_{peak}) عند سد الموصل ومدخل مدينة الموصل والذي قدره (443994) م³/ثانية نتيجة فواقد الاحتكاك وانتشار مياه الفيضان في المنطقة الواقعة بين سد الموصل ومدينة الموصل وعلى طول مجرى النهر وكذلك زمن التأخير (lag time) بين اقصى تصريف حاصل والذي قدره (4.03) ساعة نتيجة الاستتباع الحاصل في موجة الفيضان خلال مقطع النهر بين موقع السد ومدينة والذي بلغت قيمته 56.8%.

الموصل لسيناريوهات الخزن (300-335) م فوق مستوى سطح البحر بين (4.79-1.86) ساعة من بدء الانهيار على التوالي، اما الزمن اللازم للوصول اقصى تصريف هو (7.2-4.18) ساعة من بدء الانهيار وبتصريف قدره (32660 و 337138) م³/ثانية على التوالي. اما فيما يخص اقصى تصريف خارج من السد عند فتحة الانهيار ولجميع السيناريوهات المقترحة فقد تراوحت قيمته بين ادىنى واقصى سيناريو خزن (56637-781132) م³/ثانية بعد مرور زمن مقداره (0.36-0.15) ساعة من بدء الانهيار على التوالي. وقد بلغ اقصى عمق للفيضان في مدينة الموصل (36.7) م عند سيناريو خزن في البحيرة قدره (335) م بعد مرور زمن قدره (4.68) ساعة من بدء الانهيار.

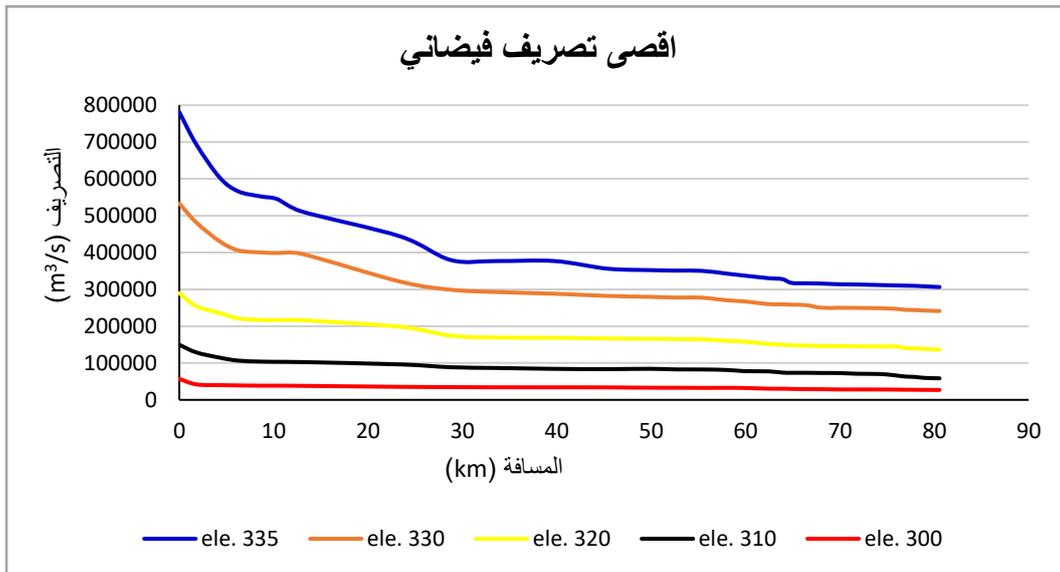


الشكل 5. مخطط يوضح شكل مقطع سد الموصل [14].

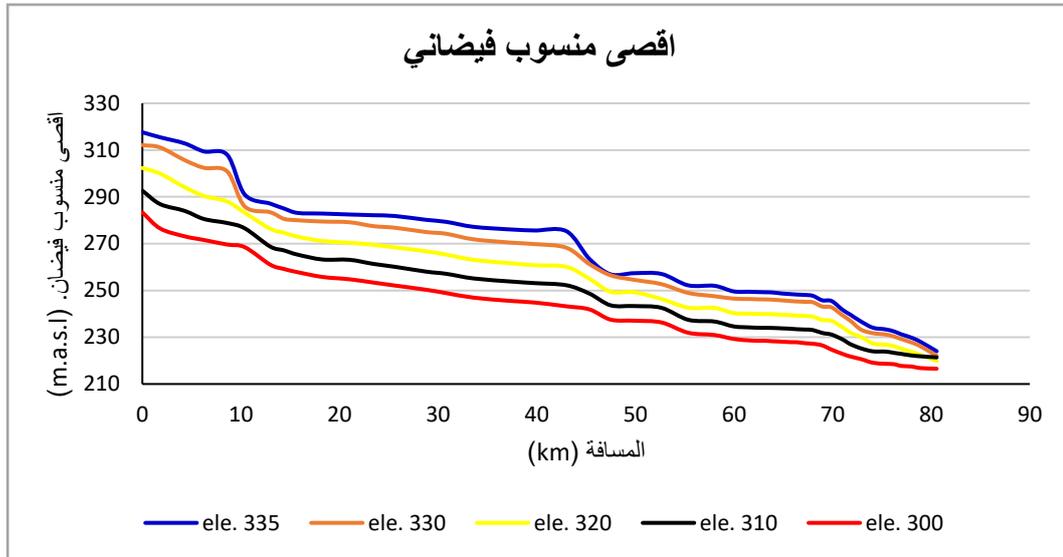
الجدول 1.

خواص سيناريوهات الخزن في سد الموصل المستخدمة في المحاكاة [2].

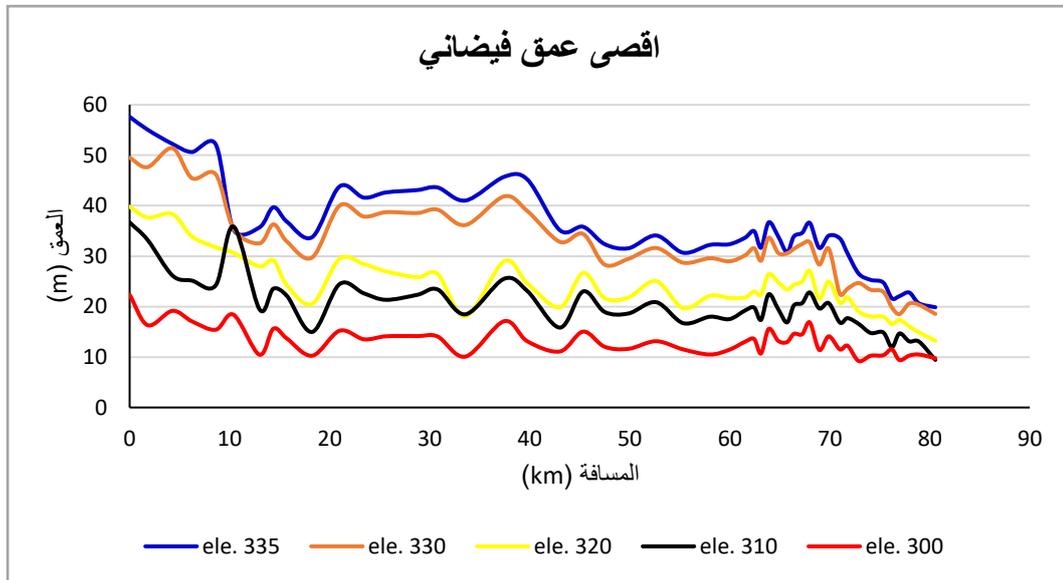
حجم الخزن 10 ⁹ م ³ *	ارتفاع الماء (م)	منسوب الماء في الخزان فوق مستوى سطح البحر (م)	تسلسل السيناريو
2.95	50	300	1
4.85	60	310	2
7.5	70	320	3
11.1	80	330	4
13.2	85	335	5



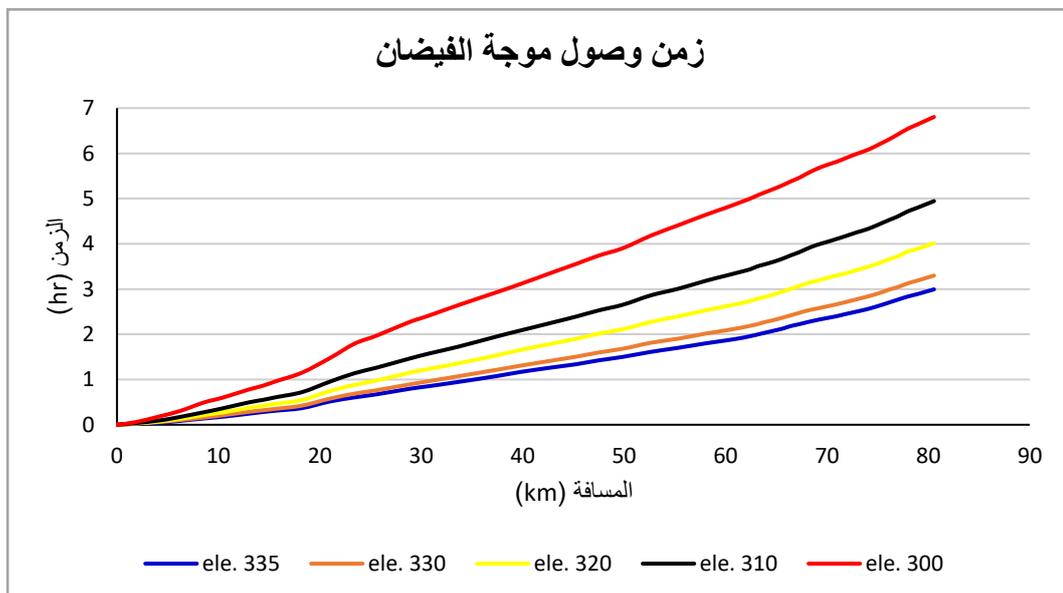
الشكل 6. مخطط يوضح اقصى تصريف على طول مجرى النهر ولجميع مناسيب الخزن.



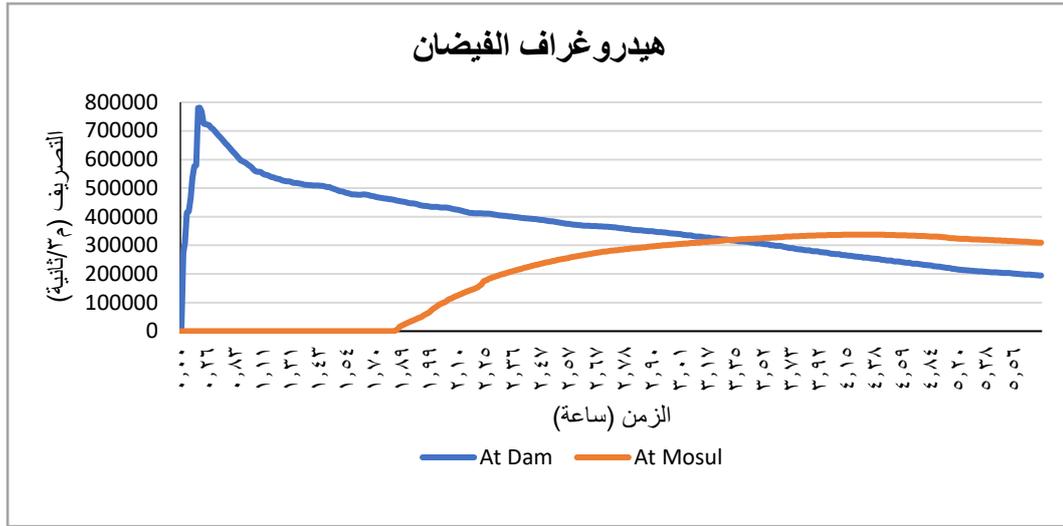
الشكل 7. مخطط يوضح اقصى منسوب فيضاني على طول مجرى النهر ولجميع مناسيب الخزن.



الشكل 8. مخطط يوضح اقصى عمق فيضان على طول مجرى النهر ولجميع مناسيب الخزن



الشكل 9. مخطط يوضح الزمن اللازم الذي تستغرقه موجة الفيضان للوصول على طول مجرى النهر ولجميع مناسيب الخزن



الشكل 10. مخطط يوضح هيدروغراف الفيضان الحاصل نتيجة الانهيار اللحظي في السد عند منسوب خزن 335 متر عند موقع السد ومدخل النهر في مدينة الموصل.

وكانت نسبة المساحة المغمورة لجانبي مدينة الموصل عند منسوب 335 هي 54.6% من المساحة الكلية لمدينة الموصل والبالغة (217.308) كم² وكان الساحل الأيسر لمدينة الموصل أكثر عرضة للغمر لطبيعة طوبوغرافية المنطقة مقارنة بالساحل الأيمن والجدول (2) يبين مساحات ونسب الغمر لجانبي مدينة الموصل ولجميع سيناريوهات الخزن. اما المساحة المغمورة للمنطقة الواقعة بين سد الموصل ومدينة الموصل لجميع السيناريوهات فهي مبينة في الجدول (3).

كما رسمت خرائط للمناطق التي ستغمر بمياه الفيضان مع الأعماق داخل مدينة الموصل نتيجة الانهيار اللحظي الافتراضي لسيناريوهات الخزن المعتمدة في الجدول (1) المستخدمة وكما موضحة بالأشكال (11، 12، 13، 14، 15) إضافة الى المناطق التي ستغمر بمياه الفيضان لكامل منطقة الدراسة وكما مبين في الشكل (16) والذي يوضح مناسيب الغمر عند انهيار السد بمنسوب خزن 335 متر فوق مستوى سطح البحر. اجري تحليل لخرائط الغمر لمدينة الموصل لكافة السيناريوهات

الجدول 2. مساحات ونسب الغمر لجانبي مدينة الموصل ولجميع سيناريوهات الخزن

نسبة المساحة المغمورة لمدينة الموصل %	نسبة المساحة المغمورة لمدينة الموصل %	المساحة المغمورة في الجانب الايمن (كم ²)	نسبة المساحة المغمورة لمدينة الموصل %	المساحة المغمورة في الجانب الايسر (كم ²)	منسوب الماء في سد الموصل m.a.s.l
26.6	23.5	20.86	26.6	34.94	300
33.3	27.7	24.55	36.5	47.96	310
40.6	31.7	28.09	45.9	60.18	320
51.8	40.3	35.65	58.7	77.08	330
54.6	43.5	38.5	61.1	80.17	335

الجدول 3.

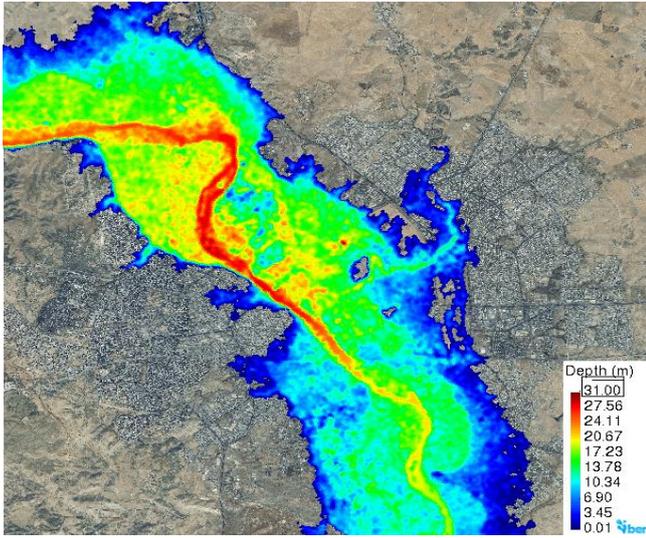
المساحة المغمورة بين سد الموصل ومدينة الموصل (كم²) لجميع سيناريوهات الخزن

منسوب الماء في السد m.a.s.l	300	310	320	330	335
المساحة المغمورة (كم ²)	69.14	114.7	158.6	202.5	245.6

الهيدرومتريية وسط مدينة الموصل والتأكد من مطابقة النتائج وبلوغ معدل مربعات الخطأ (Mean Square Error MSE) فيه (0.0529) وباعتبارها قيمة مقبولة احصائيا. حسبت المساحة التي ستعرض للغمر بين سد الموصل ومدينة الموصل بالاعتماد على مناسيب الخزن المختلفة والتي تراوحت بين (69.14 – 245.86) كم² كحد أدنى وحد أقصى على التوالي. قدرت نسبة المساحة التي ستغمر من مدينة الموصل نتيجة موجة الفيضان والتي تراوحت بين (25.6- 54.6) % من مساحة مدينة الموصل الكلية لأدنى ولأقصى منسوب خزني على التوالي علما ان الساحل الايسر من المدينة سينال الجزء الأكبر من هذا الغمر وذلك للطوبوغرافية المنبسطة للمنطقة. تراوح الزمن الذي تستغرقه موجة الفيضان للوصول لمدينة الموصل لأدنى واقصى منسوب خزني في سد الموصل بين (1.86-4.79)

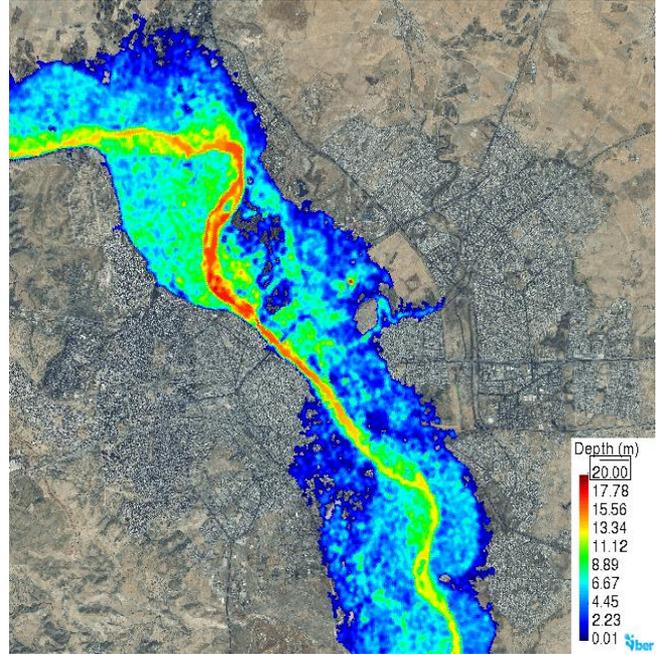
6-الاستنتاجات (Conclusions)

استخدم نموذج (IBER) الهيدروديناميكي الذي يعتبر من النماذج الحديثة لمحاكاة موجة فيضان الانهيار اللحظي الافتراضي لسد الموصل والذي يعتمد على معادلة سانت فينانت ثنائية الابعاد لحساب العمق والسرعة لكامل منطقة الفيضان ويعمل على حلها بطريقة الحجم المحدد (Finite volume). استخدمت عدة عمليات لمحاكاة موجة الفيضان الناتجة عن الانهيار اللحظي الافتراضي للسد ولعدة مناسيب خزن لبحيرة سد الموصل (300، 310، 320، 330، 335) متر فوق مستوى سطح البحر وذلك بعد اختبار صلاحية النموذج الحاسوبي لحفظ الكتلة (Mass Conservation) إضافة الى تشغيله لأقصى تصاريح فيضانية مطلقة من سد الموصل في نيسان 1988 ومقارنة النتائج مع القيمة الحقيقية المرصودة في المحطة

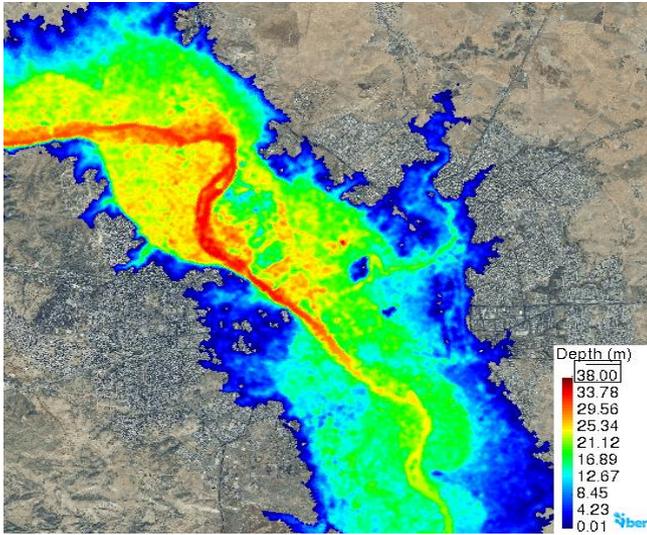


الشكل (13): خارطة توضح حدود واعماق الغمر داخل مدينة الموصل نتيجة انهيار السد اللحظي عند منسوب خزني 320م.

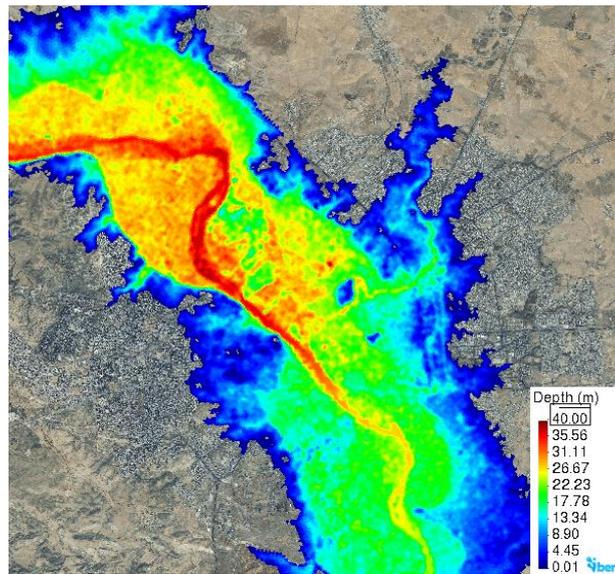
ساعة بعد حدوث الانهيار ، اما الزمن اللازم لوصول اقصى تصريف لموجة الفيضان فقد تراوح ما بين (7.2 - 4.18) ساعة بعد حدوث الانهيار ويتصرف مقداره (32660-337138) م³/ثانية. تم إيجاد اقصى تصريف خارج من سد الموصل نتيجة الانهيار اللحظي ولأسوأ سيناريو منسوب خزني (335) متراً فوق مستوى سطح البحر وبلغ قيمته (781132) م³/ثانية وقد بلغ اقصى عمق فيضاني داخل مدينة الموصل ولأسوأ سيناريو خزني (36.7) متراً بعد مرور زمن مقداره (4.68) ساعة من بدء الانهيار. بلغت قيمة نسبة الاستتباب (attenuation) الحاصل في اقصى تصريف بين موقع السد وعند مدينة الموصل ولأسوأ سيناريو منسوب خزني (335) متر فوق مستوى سطح البحر 56.8% بينما بلغت قيمة زمن التأخير (lag time) بين الموقعين المذكورين (4.03) ساعة.



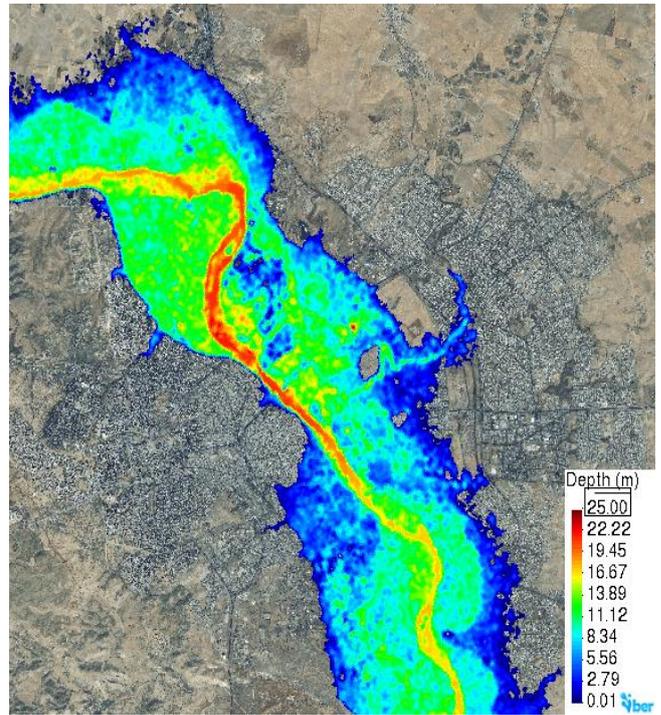
الشكل (11): خارطة توضح حدود واعماق الغمر داخل مدينة الموصل نتيجة انهيار السد اللحظي عند منسوب خزني 300م.



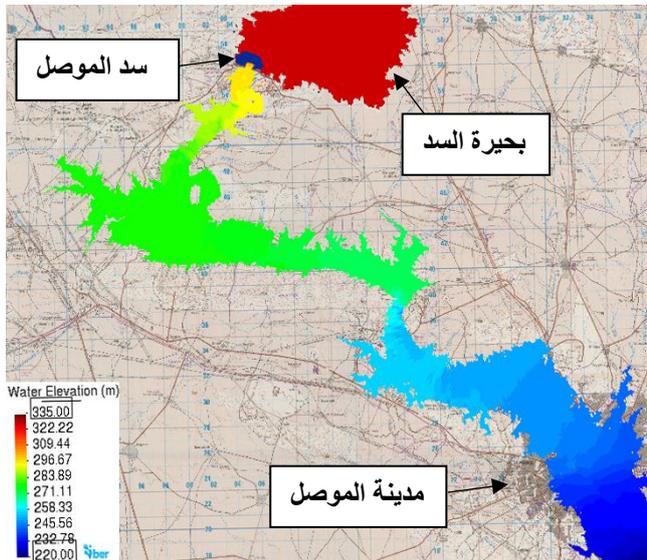
الشكل (14): خارطة توضح حدود واعماق الغمر داخل مدينة الموصل نتيجة انهيار السد اللحظي عند منسوب خزني 330م.



الشكل (15): خارطة توضح حدود واعماق الغمر داخل مدينة الموصل نتيجة انهيار السد اللحظي عند منسوب خزني 335م.



الشكل (12): خارطة توضح حدود واعماق الغمر داخل مدينة الموصل نتيجة انهيار السد اللحظي عند منسوب خزني 310م.



الشكل (16): خارطة توضح حدود ومناسيب الغمر لكامل منطقة الدراسة نتيجة انهيار السد اللحظي عند منسوب خزني 335م.

References

Internet Source: How to download and install IBER software. Available from: <http://iberaula.es/54/iber-model/downloads>.

- [2] Al-Taiee TM & M.Rasheed AM., Simulation Tigris River Flood Wave in Mosul City Due to a Hypothetical Mosul Dam Break. *Damascus University Journal* 2009; **25** (2):17-36.
- [3] Doğan A, Vanolya MM & Rukundo E. Role of flood warning system on reduction loss of life in dam break scenarios. Fourth National Symposium on Dam Safety. 2014, October; Elazig/Turkey; DOI: 10.13140/2.1.2973.5687.
- [4] Álvarez M, Enrique Peña JP, & Bermúdez M. Two-Dimensional Dam-Break Flood Analysis in Data-Scarce Regions: The Case Study of Chipembe Dam, Mozambique. *Water Journal* 2017; **9** (6): 432-450. doi:10.3390/w9060432
- [5] Basheer TA, Wayayok A, Yusuf B & Kamal MD. Dam Breach Parameters and Their Influence on Flood Hydrographs for Mosul Dam. *Journal of Engineering Science and Technology* 2017; **12** (11): 2896 – 2908
- [6] Mao J, Wang Sh, Jianhua Ni, Changbai Xi & Wang J. Management System for Dam-Break Hazard Mapping in a Complex Basin Environment. *ISPRS International Journal of Geo-Information* 2017; **6** (6):162-175. DOI:10.3390/ijgi6060162

[7] Khaleel MS, Mahmood MQ. A Computer Program for Estimating the Sediment Load Entering the Right Side of Mosul Dam Reservoir. *Tikrit Journal of Engineering Sciences* 2018; **25**(1):60-68. DOI: <http://dx.doi.org/10.25130/tjes.25.1.09>

[8] Nineveh Governorate. Mosul Municipality Sectors. Mosul City annual sector survey 2019.

[9] FEMA, Federal Guidelines for Inundation Mapping of Flood Risks Associated with Dam Incidents and Failures: *United States Federal Emergency Management Agency*, Washington, DC, USA; 2013: p-949

- [10] Republic of Iraq. Task order 8 Mosul Dam study final report; August 2005.
- [11] Kamboh SA, Izzatul NS, Labadin J & Monday O Eze. Simulation of 2D Saint-Venant equations in open channel by using MATLAB. *Journal of IT in Asia* 2015; **5** (1): 15-22.
- [12] Versteeg HK & Malalasekera W. An Introduction to Computational Fluid Dynamics the Finite Volume Method. 2nd Edition; England; 2007.
- [13] Talal AB. Simulation of Mosul Dam Breaks using Basement Model. PHD dissertation faculty of Civil and Environmental Engineering, University of Putra, Malaysia: 2018.
- [14] Mosul Dam Project. Ministry of Irrigation, State organization of Dams. General Establishment of Mosul Dam; *Monthly Report No. 26/83, Vol. 1*;1982.
- [15] Singh, K.P. and Snorrason, A. (1984). Sensitivity of outflow peaks and flood stages to the selection of dam breach parameters and simulation models, *Journal of Hydrology* 1984, **68**(1-4): 295-310.
- [16] MacDonald, T.C. and Langridge-Monopolis, J.. Breaching characteristics of dam failure. *Journal of Hydraulic Engineering* 1984, **110**(5):567-586.
- [17] Bureau of reclamation, (1988). Downstream hazard classification guidelines. ACER. *Tech. Memorandum No. 11, U.S. Dept. of the interior. Denver, 57.*
- [18] Von Thun J L and Gillette D R. Guidance on breach parameters. Internal Memorandum, U.S. Dept. of the Interior, Bureau of Reclamation Denver, Colorado, USA; 1990.
- [19] Froehlich D C. Embankment Dam Breach Parameters and Their Uncertainties. *Journal of Hydraulic Engineering* 2008; **134** (12): 1708-1721. DOI: 10.1061/ASCE0733-94292008134:121708.
- [20] Internet Source: United States Geological Survey website to download the Digital Elevation Model (DEM). Available from: <https://earthexplorer.usgs.gov/>
- [21] Chow V T. Open channel hydraulic: *McGraw-Hill Book Company, Inc; New Yourk; 1959.*
- [22] Dawood BK & Jamaal AA. Stage –Discharge Relationship for The Hydrometry Station at Mosul. *AL-Rafidain Engineering Journal* 2007; **15** (2): 38-46.