

نمذجة المحاكاة الهيدرولوجية والهيدروليكية لتقييم أثر سد النهضة الإثيوبي على مصر والسودان والنتائج الجيومورفولوجية باستخدام التقنيات الحديثة

د. محمد الراوي دندراوي^(٢)
elrawy@aswu.edu.eg

د. ناصر عبد الستار عبد الهادي نوح^(١)
naa10@fayoum.edu.eg

الملخص: هدفت الدراسة إلى تطبيق التقنيات الحديثة المتمثلة في الاستشعار عن بعد، ونظم المعلومات الجغرافية في دراسة الآثار الهيدرولوجية والجيومورفولوجية المحتملة في حالة انهيار سد النهضة الإثيوبي على مصر والسودان باستخدام نمذجة المحاكاة Simulation التي تقدمها التقنيات الحديثة، مما يساعد متخذي القرار في التعرف على ما قد يكون عليه الوضع المستقبلي للبلاد في حالة انهيار هذا السد في أي وقت نتيجة للعوامل الطبيعية أو البشرية.

واعتمدت الدراسة على المنهج التطبيقي من خلال دراسة العلاقة بين الأشكال الجيومورفولوجية من جانب وعلاقتها وتأثرها بالأنشطة البشرية من جانب آخر كما هو الحال في علاقة الجنادل بكميات تدفق المياه باتجاه الشمال، وأثر كل منهما في حماية مصر من أخطار تدفق كميات المياه الضخمة والمنهج الإقليمي باعتبار المنطقة جزءاً من إقليم جغرافي واضح وهو حوض نهر النيل، وهو من أنسب المناهج لدراسة أشكال متعددة في منطقة ذات أبعاد وامتدادات محددة.

وقد تم استخدام الأسلوب الكمي والأسلوب الكارتوجرافي من خلال عمل الخرائط الرقمية وتحليل المرئيات الفضائية والصور الجوية باستخدام نظم المعلومات الجغرافية (GIS) وتقنيات الاستشعار عن بعد (RS). وقد توصلت الدراسة إلى مجموعة من النتائج والتوصيات أهمها إمكانية تخزين تدفق المياه القادمة من هضبة البحيرات الاستوائية في دول المنبع بعمل سدود بالاتفاق بين مصر ودول المنبع للاستفادة من المياه في موسم جفاف النيل الأزرق وإنشاء سدود حماية داخل بحيرة ناصر لتقليل سرعة المياه في حالة انهيار سد النهضة في منتصف البحيرة شمال ترعة مفيض توشكى وهي منطقة ضيقة عرض البحيرة فيها ١٣٠٠ متر، بالإضافة إلى تعميق ترعة مفيض توشكى وذلك لتسهيل تحويل ودخول المياه لبحيرات منخفض توشكى بسهولة وسرعة.

الكلمات المفتاحية: الميزانية المائية، الحوض الأعلى للنيل الأزرق، النمذجة الهيدرولوجية، سد النهضة GERED، برنامج WMS، نموذج HEC-1

^(١) استاذ الجغرافيا الطبيعية المساعد ، معهد البحوث والدراسات الإستراتيجية لدول حوض النيل - جامعة الفيوم
^(٢) مدرس الجغرافيا الطبيعية ونظم المعلومات الجغرافية، معهد البحوث والدراسات الإفريقية ودول حوض النيل - جامعة أسوان

مقدمة:

تعتبر الدراسة الهيدرولوجية من الدراسات المهمة لما تحتويه من معرفة مصادر المياه وتتبعها والاستفادة منها والحماية من أخطارها. ويقدم هذا البحث طريقة للتكامل بين برمجيات نظم المعلومات الجغرافية والنماذج الهيدرولوجية لتقييم أثر انهيار سد النهضة على مصر والسودان، حيث تمثل النماذج الهيدرولوجية إحدى التقنيات المهمة والوسائل الناجحة لدراسة أمن وسلامة السدود وإدارة كوارثها.

فالتطور التقني الكبير الذي شهدته صناعة الحاسبات الآلية في امتلاكها قدرات تخزينية عالية وسرعات كبيرة في أداء العمليات الحسابية؛ جعلت النماذج الهيدرولوجية أداة فعّالة في التنبؤ بانهايار السدود وإدارتها، حيث أسهمت تكنولوجيا تخزين البيانات عالية الجودة، خاصة نماذج الإرتفاعات الرقمية (DEM)، وتطوير الأدوات العددية والحسابية إسهاماً كبيراً في تطوير النماذج الهيدرولوجية لتحويل نظم الأحواض المائية إلى نظام رقمي يحتوى على كافة المعلومات الجغرافية والهيدرولوجية باستخدام برنامج نمذجة الأحواض المائية Watershed modelling system (WMS) وبرنامج (HEC-RAS1)^(٣)

وبعد هذا البحث دراسة حالة لهذه النماذج على الأحواض التي تصب في نطاق تخزين سد النهضة الأثيوبي، وقد تم خلاله جمع البيانات المتعلقة بالمنطقة وبناء قاعدة بيانات رقمية باستخدام تقنيات نظم المعلومات الجغرافية والنموذج الهيدرولوجي وبيانات المحطات المناخية المنتشرة في حوض النيل الأزرق الأعلى، كما تم عمل محاكاة لتساقط المطر بأربعة احتماليات متعددة لكمية

^(٣) صُمم هذا البرنامج من قِبل وزارة الدفاع الأمريكية وسلاح المهندسين الأمريكيين من أجل إدارة الأنهار ومحاكاة الفيضانات وهو نموذج أحادي البعد (1D) يدرس التدفقات المضطربة والثابتة في جريان الأنهار (Steady and turbulent Flow) والتدفقات الغير مضطربة وغير ثابتة مثل الفيضانات الناجمة عن انهيارات السدود (kowalczuk,et.al. , 2018)

التساقط اليومي وهي (١٥، ٣٠، ٥٠، ١٠٠م)، حيث تبين أن الحوض الأعلى للنيل الأزرق أمام سد النهضة الإثيوبي يعد شديد الخطورة في حالة حدوث أمطار بمقدار أكثر من ٥٠ ملم، خاصة إذا استمرت فترة التساقط بهذا المقدار؛ وذلك بسبب طول فترة تدفق المياه في الحوض، حيث يستمر تدفق المياه في الحوض لمدة تزيد عن (٣٩ ساعة) من بداية سقوط الأمطار وتولد حركة الجريان حتى انتهاء زمن التدفق للمياه الجارية.

وقد أعلنت إثيوبيا في أبريل ٢٠١١ عن اعتزامها بناء سد النهضة الإثيوبي (GERD)، أحد أكبر السدود في العالم، وأن بناء هذا السد سوف يصل تأثيره جنوباً في إثيوبيا حوالي ١٧٠٠ كم^٢ على بعد حوالي ٨١١ كم من أديس أبابا وحوالي ١٥ كم من الحدود السودانية، حيث تقدر السعة التخزينية للسد حوالي ٧٤ مليار م^٣ من المياه، أي أن سعته التخزينية أضعاف حجم بحيرة تانا بدولة إثيوبيا (Mohamed & Elmahdy, 2017).

وقد تم تطبيق التقنيات الحديثة المتمثلة في الاستشعار عن بعد (Remote Sensing)، ونظم المعلومات الجغرافية (Geographic Information System)، في دراسة الآثار الهيدروجيولوجية المحتملة في حالة انهيار سد النهضة الإثيوبي على مصر والسودان باستخدام نمذجة المحاكاة التي تقدمها التقنيات الحديثة، مما يساعد متخذي القرار في وضع حلول مناسبة لتفادي هذه الأخطار والآثار الناجمة عنها.

مشكلة الدراسة:

تمثل السدود المائية أهمية كبيرة بالنسبة للدول التي تقوم بإنشائها حيث أنها تستخدم في تخزين المياه وتوليد الكهرباء وحماية البلاد من آثار الفيضانات إلا أن هذه السدود قد تكون سبباً رئيساً في حدوث الدمار وغرق البلاد بشكل مركز في وقت وجيز في حالة انهيارها نتيجة لأسباب تتعلق بالعوامل الطبيعية مثل

التركيب الجيولوجي أو الحركات الصدعية أو الزلازل وغيرها أو نتيجة للحروب واستهداف السدود بالقصف وأعمال التخريب مما يحولها من أداة نافعة إلي أداة تدمير لا يمكن السيطرة على عواقبها ونتائجها بعد الانهيار.

تكمّن مشكلة الدراسة في:-

- ١- أن هناك احتمالية انهيار سد النهضة.
- ٢- تأثير احتمالات حدوث تذبذب كمية المياه المتدفقة من الحوض الأعلى للنيل الأزرق بسبب إنشاء السد.
- ٣- يمكن أن تحدث تغيرات جيومورفولوجية نتيجة لبناء السد وتغير المجرى النهري وغرق الجزر النهرية تحت بحيرة سد النهضة.

تساؤلات الدراسة:

- تهدف الدراسة إلى الإجابة على مجموعة من التساؤلات منها: -
- ١- ما حجم المياه التي سوف يحتجزها سد النهضة الإثيوبي من النيل الأزرق (الحوض الأعلى)؟
 - ٢- ما حجم المياه التي سوف تخرج من سيطرة سد النهضة (الحوض الأدنى)؟
 - ٣- ما المناطق التي سوف تتأثر في حالة انهيار سد النهضة؟ على المستوى الدولي: اثيوبيا - السودان - مصر.
 - ٤- ما حجم وعدد مراكز العمران المتأثرة بانهيار السد.
 - ٥- ما مدى تأثير مصر من كمية المياه المتدفقة في حالة انهيار السد؟
 - ٦- ما الحلول التي يمكن من خلالها مجابهة خطر انهيار السد والحد من خطورته على مصر والسودان؟

والإجابة على هذه التساؤلات سوف تعطي إمكانية تقييم الوضع المستقبلي لدول المصب في حالة انهياره، وتحديد مواضع إنشاء الحماية على النيل في

مصر والسودان، وتحديد دور بحيرات توشكى في المواجهة والمساهمة في حل المشكلة.

أهمية الدراسة:

تفيد الدراسة صانعي القرار لاتخاذ آليات مستقبلية لمواجهة أي خطر محتمل حالة انهيار سد النهضة، وذلك من خلال نمذجة المحاكاة التي تظهر مواضع الخلل والمناطق التي سوف تتعرض للغمر والدمار جراء غمر المياه لها، كما تفيد في توضيح سبل الحماية في مصر ممثلة في منخفضات توشكى، وكذلك الجنادل المنتشرة على طول مجرى النيل من شمال الخرطوم بنحو ٩٠ كم حتى حدود مصر الجنوبية والتي تعمل كسدود حماية طبيعية تقوم على تنظيم عملية تدفق المياه باتجاه مصر، في حالة تدفق كميات كبيرة من المياه والتي من أهمها خانق سيلوكة. وتكمن أهمية الدراسة في الآتي: -

١- التعرف على المشكلات التي قد يسببها سد النهضة الإثيوبي على مصر والسودان في حالة انهياره.

٢- كمية المياه الضخمة التي سوف يتم تخزينها أمام هذا السد

٣- يعتبر هذا السد من أكبر السدود التي بنيت على المجاري الرئيسية لحوض النيل بعد السد العالي وذلك لسعته التخزينية التي قد تصل إلى ٧٤ مليار م^٣ وأنه سوف تنتج عنه آثاراً سلبية.

٤- أن بناء السد في منطقة شديدة الارتفاع وشديدة الانحدار، يعرضه للخطر.

٥- أنه تم تغيير التصميم ليزيد ٧٤ مليار م^٣ بدلاً من ١٤ مليار م^٣ كاستيعاب للسد.

أهداف الدراسة:

تسعى الدراسة إلى تحقيق الأهداف التالية: -

١- تقديم دراسة توضح أهمية الجنادل والمناطق الخانقية في تحجيم عملية تدفق المياه باتجاه مصر.

٢- التعرف على دور إسهام التقنيات الحديثة في عمل محاكاة ما قد تكون عليه دولتي المصب في حالة انهيار السد.

٣- تحديد الدور الذي تلعبه أنظمة المعلومات الجغرافية والاستشعار عن بعد، في دراسة وتقييم الوضع المستقبلي لمجرى النيل من الخرطوم حتى السد العالي.

٤- الكشف عن التغيرات التي يمكن حدوثها في المجرى والجزر وخصائص قطاعاته العرضية قبل وبعد تشغيل السد.

مناهج وأساليب الدراسة:

١- **المنهج التطبيقي:** وهو المنهج الذي يتخذ من دراسة السبب والنتيجة وسيلة لتحقيق الغرض منه، أي أنه يبحث في العلاقة بين الإنسان واستخدامه لأشكال سطح الأرض (التركمانى، ٢٠١١، ص ٢٢). ويركز هذا المنهج على العلاقة بين الأشكال الجيومورفولوجية من جانب وعلاقتها بالأنشطة البشرية من جانب آخر كما هو الحال في علاقة الجنادل بكميات تدفق المياه باتجاه الشمال، وأثر كل منهما في حماية مصر من أخطار تدفق كميات المياه الضخمة.

٢- **المنهج الإقليمي:** تمثل المنطقة جزءاً من إقليم جغرافي واضح وهو حوض نهر النيل، وهو من أنسب المناهج التي سوف تستخدم هنا لدراسة أشكال متعددة في منطقة ذات أبعاد وامتدادات محددة لإظهار السبب والنتيجة (التركمانى، ٢٠١٩)، ويهدف تطبيق هذا المنهج إلى دراسة علاقة كميات سقوط الأمطار على الأحواض المائية الفرعية في حوض النيل الأزرق بالمنطقة وكميات المياه المتدفقة إلى السودان ومصر، فهي علاقة سبب ونتيجة، ودراسة علاقات السبب والنتيجة

والعوامل من خلال البعد الإقليمي للحدث المدروس ووضعه الحالي والتوقع المستقبلي ومحاولة التفسير.

وقد استخدم الباحثان عدداً من الأساليب في هذه الدراسة من أهمها: -

١. الأسلوب الكمي: يتمثل هذا الأسلوب في جمع البيانات الرقمية والقياسات الخاصة بالمجري المائية واستخدام الأرض وعلاقته بكميات تدفق المياه في النيل الأزرق.

٢. الأسلوب الكارتوجرافي: وذلك من خلال عمل الخرائط الرقمية وتحليل المرئيات الفضائية والصور الجوية باستخدام نظم المعلومات الجغرافية (GIS) وتقنيات الاستشعار عن بعد (RS).

النمذجة الهيدرولوجية:

تمثل الدراسات الهيدرولوجية أهمية كبيرة لمعرفة وتتبع مخاطر الفيضانات والسيول مما يقدم الحلول المناسبة لإدارة الموارد المائية وحماية الأرواح والممتلكات لدى الدول والمجتمعات، ويقدم هذا البحث طريقة حديثة لدمج برامج نظم المعلومات الجغرافية مع النماذج الهيدرولوجية مثل نموذج (HEC-1) في برنامج (WMS) وتطبيق هذا النموذج على الأحواض الفرعية للنيل الأزرق التي ترفد مياهها للمجرى الرئيسي للنيل الأزرق والتي سوف يتم تخزين مياهها أما سد النهضة الإثيوبي على الأراضي الإثيوبية.

توفر أدوات برنامج (WMS) آلية حديثة لتسهيل عملية النمذجة الهيدرولوجية والهيدروليكية حيث يعد نموذج (HEC-1) أداة شاملة للنمذجة الهيدرولوجية، وقد طور هذا النموذج بواسطة سلاح المهندسين بالجيش الأمريكي (U.S. Army)، وهو نموذج صمم خصيصاً لمحاكاة عمليات سقوط وجريان مياه الأمطار (simulate rainfall-runoff) للأحواض المائية والأحواض الفرعية.

وتم في هذه الدراسة التكامل بين برمجيات نظم المعلومات الجغرافية حيث استخدمت أداة (Archydro) التي توجد في برنامج (ArcGIS) ونموذج (HEC-1) أحد نماذج المحاكاة الهيدرولوجية في برنامج (WMS)، وقد تم تحليل الخصائص المورفومترية والهيدرولوجية للحوض الأعلى للنيل الأزرق، من خلال إعداد النماذج الهيدرولوجية والهيدروليكية للأنهار والعواصف، وأمكن من هذه النماذج تمثيل مسارات التدفق، ونمذجة التضاريس، وكذلك عمق المياه وقوة التصريف؛ حيث تم تقسيم الحوض الأعلى للنيل الأزرق الواقع أمام السد فيما بينه وبين بحيرة تانا إلى العديد من أحواض التصريف الفرعية (sub-basin) ذات المساحات المختلفة، وحساب زمن التصريف (Flow Time) وكمية المياه الجارية (Water Volumes) ومحاكاة جريان الأمطار (rainfall-runoff simulation)، وإنشاء قاعدة بيانات جغرافية تعمل في بيئة نظم المعلومات الجغرافية.

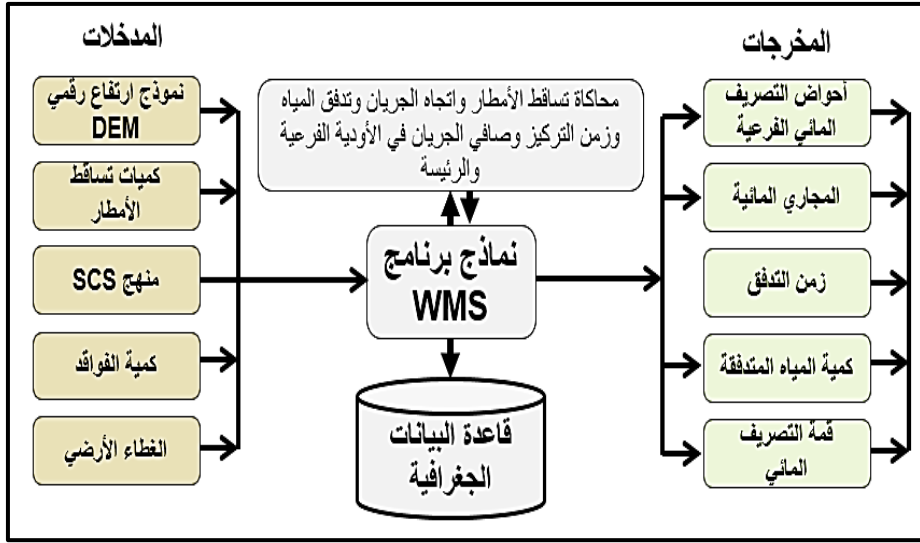
اتخذت عملية تحليل برنامجي (HEC-1) و (WMS) في خطوات متعددة أهمها:
- توفير نموذج ارتفاع رقمي (DEM) بنظام إحداثيات Universal Transverse Mercator.

- استخدام أداة (TOPAZ) لحساب اتجاهات التدفق (flow directions) وتراكم التدفق (flow accumulations).

- يليها استخلاص شبكة الأودية (Streams).
- ثم تقسيم الحوض الأعلى للنيل الأزرق أمام سد النهضة إلى أحواض فرعية (Sub-Basins)، وذلك لمراعاة التباين في استخدام الأراضي ونوع التربة وتضاريس كل حوض فرعي؛ وذلك لحساب صافي كمية المياه المتدفقة من كل حوض بدقة، وتقدير كمية الفيضان فوق الحوض بأكمله، ومعرفة كمية الجريان المائي النهائي التي سوف يتم التحكم فيها من خلال بناء سد النهضة الإثيوبي.

كما تم في هذه الدراسة جمع بيانات نماذج الارتفاع الرقمية (DEM) بدقة ٩٠ متراً الذي يسمى (SRTM) وهو اختصار لمصطلح (Shuttle Radar Topography Mission data)، وبيانات استخدام الأرض (Landuse/Landcover)، واعتمد على منهج (SCS Method)، وقيم المنحنى المركب (CN) وهو اختصار Composite Curve Numbers وهو عبارة عن منهج (Method) أو طريقة لتقدير كفاءة التسرب (infiltration capacity) والجريان السطحي (runoff) بناء على أنواع التربة (Soil) وأنواع الغطاء الأرضي/ واستخدام الأرض (land/use cover type).

كما تم ادخال كمية الأمطار التي تسقط على كل حوض وحساب قيم المنحنى المركب (CN) اعتماداً على نوعية التربة (Soil) واستخدام الأرض والغطاء الأرضي (land use/cover)، وحساب وقت التركيز (time of concentration)، وحساب وقت التأخر (Time Lag)، والانحدار (Slope)؛ حيث يقوم برنامج (WMS) بحساب قيم المنحنى المركب (CN) لكل حوض من الأحواض الفرعية بطريقة آلية بناء على نوعية التربة (Soil) واستخدام الأرض والغطاء الأرضي، حيث بلغت قيم المنحنى المركب (CN) في الاحواض الفرعية المختلفة ٧٩، وبالتالي أمكن الخروج بنتائج دقيقة حول الفترة الزمنية التي يستمر فيها تدفق الجريان (Time of Peak) وكمية التصريف/ لكل ثانية، وكذلك إجمالي كمية المياه الجارية في كل حوض كما يوضحه شكل (١).



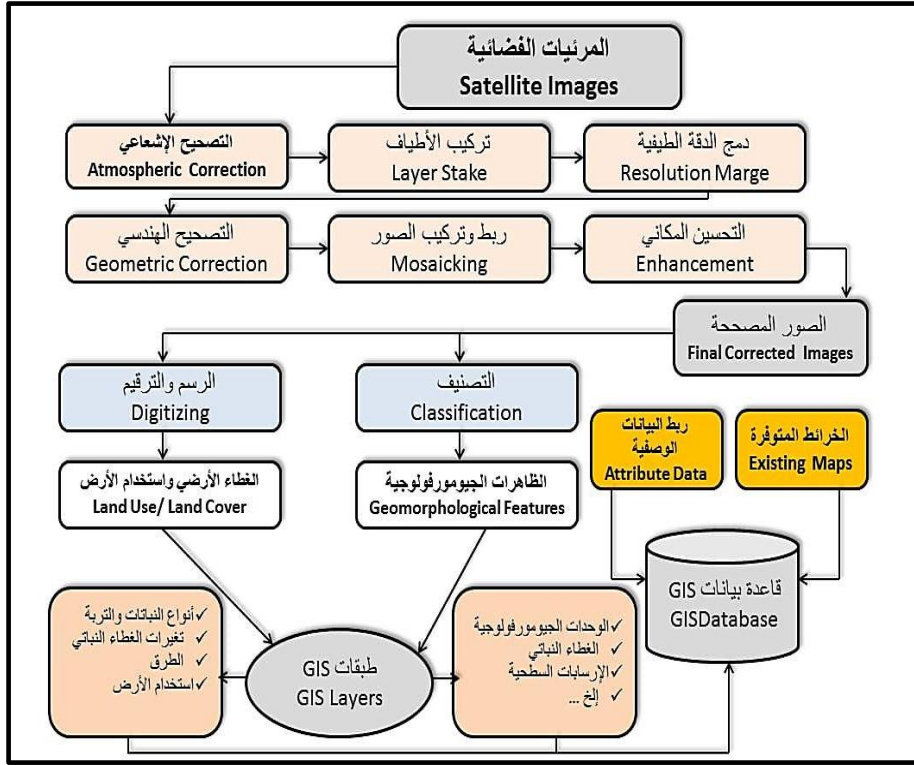
المصدر: عمل الباحثان

شكل (١) خريطة تدفق لعملية وخطوات تحليل الخصائص الهيدرولوجية لحوض النيل الأزرق

مصادر ووسائل الدراسة:

أ- الخرائط والمرئيات الفضائية:

اعتمدت هذه الدراسة على تحليل خرائط هيئة المساحة الجيولوجية الأمريكية الخاصة بالتركيب الجيولوجي واستخدام الأرض في منطقة الدراسة، كما تم الاعتماد على المرئيات الفضائية الأمريكية (Landsat) والتي تم الحصول عليها من روابط موقع (USGS) وشملت مرئيات القمر الصناعي (OLI) Landsat-8 عام ٢٠١٨، بدقة مكانية ١٥×١٥ متراً، والمرئيات الفضائية للقمر الصناعي الأوربي (Rapid Eye) بدقة ٥ متر لموضع سد النهضة والصور الفضائية التي توجد على برنامج (Google Earth).



المصدر: عمل الباحثان

شكل (٢) خطوات عمل معالجة المرئيات الفضائية

كما استخدم نموذج الارتفاع الرقمي (DEM) بدقة ٩٠ متراً لإظهار شبكة التصريف المائي في حوض النيل الأزرق وتحديد السعة التخزينية للبحيرات أمام السدود المقامة عليه، حيث تحتاج المرئيات الفضائية التي يتم استخدامها إلى العديد من العمليات والمعالجات لإعدادها تمهيداً لاستخلاص المعلومات شكل (١) منها ما يلي:-

-النمذجة (Modeling): تم عمل مجموعة من النماذج (Models) باستخدام برنامج (ArcGIS) منها ما هو خاص باستخراج الارتفاعات والانحدارات وشبكة التصريف المائي ومنها ما هو يختص بحساب مناسيب البحيرات التي سوف

تغمر مياهها الأراضي أمام السدود، وأخرى لعمل محاكاة هيدرولوجية للأودية والأحواض المائية. كذلك تم عمل رصد للتغيرات في مواضع البحيرات المتوقع ظهورها وتحديد اتجاهات تدفق المياه ورصد التغيرات (**change detection**) التي قد تحدث على جانبي السهول الفيضية الحالية وغرق العمران. وأخيراً عمل دراسة تطبيقية على جيومورفولوجية المجرى سواء تأثر الجزر، والمقطع العرضي، والسهل الفيضي أو على تغيرات المجرى والقناة النهرية نفسها.

-**بناء قاعدة البيانات:** تم استخدام برمجيات نظم المعلومات الجغرافية لتحليل وعرض مشكلة الدراسة باستخدام أدوات التحليل المكاني (**Spatial Analysis**)، وأدوات العرض والمحاكاة؛ وذلك من خلال ما تم إنشاؤه من خرائط لحساب المساحات والتغيرات التي قد تطرأ على السهل الفيضي والمناطق العمرانية التي توجد حوله وذلك في حالة انهيار سد النهضة وتحديد اتجاه حركة المياه في المجرى من السد وسرعة تدفقها عبر الجنادل.

ب-الدراسات السابقة:

هناك العديد من الدراسات التي اهتمت بدراسة إنهيار السدود والفيضانات الناتجة عنها، ومدى استخدام التقنيات الحديثة لتقييم أخطارها، ومحاولة التنبؤ بها مع وضع حلول مناسبة لتفادي أخطارها ومن أهم هذه الدراسات: -

١. دراسة (Alemu & Belachew, 2008) بعنوان "تقييم أخطار الفيضانات في سهل فوجيرا ووريدا باستخدام تقنية الاستشعار عن بعد ونظم المعلومات الجغرافية" تناولت هذه الدراسة جيومورفولوجية سهل فوجيرا والذي يعد من أكثر المناطق تعرضاً لأخطار الفيضانات في شمال غرب إثيوبيا، وقد استخدمت

الدراسة التقنيات الحديثة لنظام المعلومات الجغرافية والاستشعار عن بعد لتقييم الفيضانات وأخطارها في هذا السهل ودراسة العوامل التي ساهمت في حدوثها.

٢.دراسة (Eldho, T.,2009) بعنوان "نمذجة وتوصيف مناطق منابع المياه باستخدام تقنيات الاستشعار عن بعد ونظام المعلومات الجغرافية" حيث تناولت هذه الدراسة نمذجة منابع المياه من خلال دمج العمليات الهيدرولوجية المختلفة التي تحدث على تجمعات المياه والمتمثلة في التطورات الحديثة في نمذجة منابع المياه من خلال الاستخدام المتكامل للطرق العددية والاستشعار عن بعد وتقنيات نظم المعلومات الجغرافية .

٣.دراسة (خوجلي ٢٠١٠) بعنوان "استراتيجيات وجهود معالجة تأثير فيضانات نهر القاش على مدينة كسلا"وتناولت هذه الدراسة جيومورفولوجية نهر القاش وأسباب فيضاناته المتكررة وأخطارها على السكان، وكذلك أسباب تلك الأخطار، وقد خلصت الدراسة إلى وضع استراتيجية واضحة للحد من أخطار فيضان نهر القاش والتقليل من آثاره التدميرية.

٤.دراسة (Eshra, 2010) بعنوان "قاعدة بيانات نظم المعلومات الجغرافية لحوض نهر النيل" تناولت الدراسة نهر النيل وخصائصه الطبيعية، والتغيرات الجيومورفولوجية وتحليلها باستخدام مختلف الوسائل التقنيات الحديثة والتي تحتاج إلى معلومات وقاعدة بيانات كافية في تحليل الدراسات النهرية، حيث تتكون قاعدة البيانات الجغرافية من العديد من الطبقات مثل خط الشاطئ، ومسار التنقل، المدن على طول النهر، والهياكل الهيدروليكية ... الخ.

٥.دراسة (Tarekegn, et. al.,2010) بعنوان "تقييم نماذج الارتفاعات الرقمية DEM من ASTER لنمذجة الفيضان الهيدروديناميكي ثنائي الأبعاد". تناولت

هذه الدراسة خصائص الفيضانات في حوض بحيرة تانا بحوض النيل الأزرق. من خلال استخدام الاستشعار عن بعد ونظم المعلومات الجغرافية مع وحدة ثنائية الأبعاد 2D، وكشفت نتائج هذه الدراسة أن تمثيل التضاريس النهرية يؤثر إلى حد كبير على خصائص الفيضان حيث تشير عمليات المحاكاة إلى أن تأثيرات مستويات مياه بحيرة تانا تنتشر إلى ١٣ كم على طول نهر ريب كما أن دقة **ASTER DEM** البالغة ١٥ م يمكن أن تكون بمثابة مدخلات للنمذجة الهيدروديناميكية ثنائية الأبعاد التفصيلية في المناطق النادرة للبيانات.

٦.دراسة (Saber,2010) بعنوان "نمذجة هيدرولوجية لمحاكاة فيضان حوض نهر النيل باستخدام بيانات الأقمار الصناعية والاستشعار عن بعد" واستخدم طريقة (SCS) في نمذجة الفيضانات واعتمد على بيانات **GPCC** من خلال تحليل البيانات الكاملة (١٩٠١-٢٠١٠) لدراسات توازن المياه العالمية والإقليمية ، من خلال تقديرات تساقط الأمطار على أساس الاستشعار عن بُعد والتحقق من النماذج الرقمية.

٧.دراسة (Abd El-Haleem, 2011) بعنوان " مخاطر الغرق وسرعة انتشار موجات الفيضان الناتجة عن إنهيار السدود "، وتناولت هذه الدراسة النماذج الرياضية المستخدمة في مجال إنهيارات السدود، والمعادلات الرئيسية المستخدمة فيها، من خلال استخدام النموذج الرياضي أحادي البعد **HR- BREACH 1D** للتنبؤ بشكل الإنهيار في السد العالي وفقاً لسيناريوهات مختلفة .

٨.دراسة (Abd El-Haleem, 2011) بعنوان "تقييم المخاطر الناتجة عن أنهيار السد العالي بأسوان باستخدام نموذج رياضي" تناولت الدراسة استخدام النموذج العددي المناسب وتطبيقه وتصميم السيناريوهات للتنبؤ بشكل ونوع

الانهيار والتنبؤ بكمية المياه الخارجة من السد حيث تستخدم النتائج في تقييم مستوى المخاطر الناتجة عن حدوث انهيار السد العالي ومساعدة متخذي القرار في وضع خطة للطوارئ وتحسين نظام مراقبة السدود.

٩. دراسة (Abdo&nasr, 2012): بعنوان "تحسين نموذج التنبؤ بالفيضان بنهر النيل الأزرق بالسودان" تناولت الدراسة تحسين نموذج التنبؤ بالفيضان باعتباره ذات أهمية حيوية لتجنب الأضرار الكارثية الناتجة عن حدوثه.

١٠. دراسة (Bashar, et. al., 2015) بعنوان "محاكاة انهيار سد الروصيرص وتأثيره على مدينة الخرطوم باستخدام النمذجة الهيدروليكية HEC-RAS1"، استخدمت الدراسة النموذج الرياضي HEC-RAS1، وأجريت عدة سيناريوهات لتمثل حالة انهيار سد روصيرص، وأن انهياره سيؤدي إلى عبور موجة الفيضان فوق سد سنار، كما أشارت النتائج إلى أن موجة الفيضان القصوى الناتجة من فشل سد الروصيرص تصل الخرطوم خلال ٤-٩ أيام عندما يتراوح أقصى تدفق ما بين (٣٣١٠٥ - ١٢٤٤٣ م^٣/ث) في مدن الروصيرص، وسنار، والخرطوم.

١١. دراسة (Wondim, 2016) بعنوان "تقييم أخطار الفيضانات في حوض تصريف وادي أوسا بإثيوبيا باستخدام تقنية الاستشعار عن بعد ونظم المعلومات الجغرافية" تناولت هذه الدراسة أخطار الفيضان بحوض نهر أوسا وهو حوض نهر رئيسي يعاني من مشاكل فيضان خطيرة في إثيوبيا. وقد تم تطبيق تقنيات نظم المعلومات الجغرافية والاستشعار عن بعد لدراسة أخطار الفيضان وعمل خريطة لمخاطر الفيضان للحد من أضرار الفيضانات.

١٢. دراسة (Dottori, F & Etal, 2016) بعنوان "تطوير وتقييم إنتاج خرائط تفصيلية لنطاقات أخطار الفيضانات العالمية" وتناولت هذه الدراسة تطوير نماذج

أخطار الفيضانات على المستوى القاري والعالمي ، لزيادة استعداد السكان لهذه الأخطار وتقليل أثارها من خلال عمليات المحاكاة الهيدرولوجية للنظام العالمي. ١٣. دراسة (willems,2016): بعنوان "تحليل تكرارية الفيضان باقليم حوض النيل" تناولت الدراسة الفروق الإقليمية في احتمالات حدوث تدفقات عالية ومنخفضة في مجرى نهر النيل شرق إفريقيا، وقد تم ذلك على أساس تحليل القيمة الإحصائية القصوى التي طبقت على حوالي مائة محطة لقياس التدفق موزعة على طول حوض النيل.

١٤. دراسة (Mohamed, M, et.al.,2017) بعنوان "تقييم الأخطار الجيومورفولوجية والآثار البيئية لسد النهضة الأثيوبي باستخدام لاستشعار عن بعد" وقد تناولت هذه الدراسة بناء سد النهضة الإثيوبي الكبير (GERD) في منطقة جبلية ودراسة الأخطار الجيومورفولوجية والآثار البيئية الناتجة عن انشاؤه، وتم استخدام نماذج الارتفاعات الرقمية SRTM, DEM والأقمار الصناعية (ALOSPALSAR) لرسم خريطة لتقييم أخطار سد النهضة والتنبؤ بالمناطق التي غمرتها الفيضانات في السودان .

١٥. دراسة (El-Nashar&Etal,2018) بعنوان "إدارة مخاطر سد النهضة الإثيوبي الكبير على مصر" تناولت هذه الدراسة تأثير سد النهضة الإثيوبي الكبير (GERD) السلبى على مصر، واقترح استراتيجيات لتخفيف هذه المخاطر من خلال اتخاذ إجراءات وسياسات لإدارة موارد المياه العذبة.

١٦. دراسة (Ayele, et.al.,2018) بعنوان "تقييم تقديرات تساقط الأمطار من خلال الأقمار الصناعية فوق حوض بحيرة تانا كمصدر لمياه حوض النيل الأزرق" وتناولت هذه الدراسة تقدير لكمية الأمطار الساقطة من خلال

الأقمار الصناعية (SRES) و تقييمها من خلال أماكن عدة بأحواض بحيرة تانا في شمال غرب إثيوبيا.

١٧. دراسة (Robi,et.al,2019) بعنوان " رسم خرائط لأخطار الفيضانات في إطار سيناريو تغير المناخ في منطقة ريب لحوض نهر النيل الأزرق ، إثيوبيا" أجريت هذه الدراسة لتحديد مدى خطر الفيضان على سهول فوجيرا في تجمعات ريب لحوض نهر النيل الأزرق في إثيوبيا وتم استخدام نموذج هيدروديناميكي ثنائي الأبعاد $2D, D$ لمحاكاة مدى غمر الفيضان وعمق الفيضان تحت سيناريو تغير المناخ في المنطقة ،و تم استخدام MIKE FLOOD إلى جانب SWAT لمحاكاة خرائط أخطار الفيضانات وفقاً لتوقعات المناخ المستقبلية القصيرة الأجل (٢٠٣٠) والفترة الطويلة (٢٠٦٠) لسيناريو RCP4.5.

١٨. دراسة (Sepehri, M&Etal,2019) بعنوان "تقييم دور السدود من خلال رسم خرائط لأخطار الفيضانات في البيئات شبه الجافة" هدفت هذه الدراسة إلى تقسيم مناطق مخاطر الفيضان وتقييم دور سدود كإنشاءات هيدروليكية فعالة في الحد من مخاطر الفيضانات،تحقيقاً لهذه الغاية، حيث ناقشت العوامل المرتبطة بالخصائص الطبوغرافية والهيدرولوجية والبشرية واثرها في تطوير مؤشرات رسم خرائط ودراسة أخطار الفيضانات.

١٩. دراسة (Abdel Hamid, H, et.al.,2020) بعنوان "الحساسية البيئية لأخطار الفيضانات باستخدام التقنيات الجغرافية في التحليل المكاني" وأظهرت الدراسة تبايناً كبيراً في حساسية الفيضانات بسبب التغير المناخي والظروف الجغرافية وأن ضعف البنية التحتية وعدم الاستعداد هما السببان الرئيسيان عن كارثة الفيضانات في السودان،واظهرت الحاجة إلى تحليل الخرائط الجغرافية

المكانية في التخفيف المناسب والتنمية المستدامة ومراقبة كبيرة للأثار السلبية للفيضانات في الخرطوم للحد من أخطارها.

٢٠. دراسة (Helwa,et.al., 2020) بعنوان " تحليل تبعيات إنهيار سد أسوان القديم على نهر النيل باستخدام برنامج HEC-RAS1"، قامت هذه الدراسة باستخدام النموذج العددي أحادي البعد HEC-RAS لمحاكاة حركة المياه الناتجة عن انهيار سد أسوان القديم وذلك في القطاع الممتد من خزان أسوان حتى قناطر إسنا، وتناولت سيناريوهات مختلفة تحاكي ظروف خرق/ كسر السد، وأوضحت نتائج الدراسة مناطق الغمر المرتبطة بتصرف ٦٠٥ مليون م^٣ يومياً تعد الأكبر من مناطق الغمر الناتجة عن حدوث إنهيار للسد مع تصرف ٢٥٠ مليون م^٣ يومياً أو أقل، تغيير عرض الكسر من ١٥٥ إلى ١٠٠٠ م يؤدي إلى تأثير ملحوظ على مناسيب وسرعات المياه في أول ١٠ كم خلف خزان أسوان ويتلاشى هذا التأثير كلياً بعد ٤٠ كم

محتوى الدراسة:

يتناول البحث نمذجة المحاكاة الهيدرولوجية والهيدروليكية لتقييم أثر سد النهضة الإثيوبي على مصر والسودان من خلال دراسة الموقع الجغرافي للمنطقة، ودراسة خصائصها الطبيعية والهيدرولوجية، والآثار والنتائج الجيومورفولوجية لتشغيل سد النهضة، بالإضافة إلى دراسة الجوانب التطبيقية باستخدام الأساليب الحديثة مثل النمذجة، والمحاكاة لأخطار انهيار سد النهضة، ومحاولة التنبؤ، والتقييم، والتحكم والمراقبة مع وضع حلول مناسبة لتفادي هذه الأخطار وذلك على النحو التالي: -

- أولاً:-الموقع الجغرافي لمنطقة الدراسة.
ثانياً:- الخصائص الطبيعية لمنطقة الدراسة.
ثالثاً:- التحليل الهيدرولوجي للمنطقة.
رابعاً:- الآثار والنتائج الجيومورفولوجية لتشغيل سد النهضة.
خامساً:- محاكاة انهيار سد النهضة.
سادساً:- النتائج والتوصيات.

وفيما يلي دراسة تفصيلية لكل عنصر من هذه العناصر على النحو التالي: -

أولاً: الموقع الجغرافي لمنطقة الدراسة:

يمتد النيل الأزرق بين دائرتي عرض 7.7081° / 17.0017° شمالاً وبين خطي طول 32.4951° / 39.009° شرقاً، ويتكون من مجموعة كبيرة من الروافد الفرعية التي تصب في المجرى الرئيسي أمام سد النهضة ومنها ما يصب خلفه في موضع سدي الروصيرص وسنار في السودان مثل رافدي الرهد والدندر، ويشكل حوض النيل الأزرق ٢٠٪ من مساحة إثيوبيا ويستحوذ على ٥٠٪ من المياه السطحية في إثيوبيا، و ٤٠٪ من الإنتاج الزراعي، ويسكنه ٢٥٪ من السكان ويمد نهر النيل بحوالي ٥٠ مليار م^٣ من كمية المياه عند أسوان (شراقي، ٢٠١٤).

ويقع سد النهضة الإثيوبي (GERD) في ولاية بيشنقول جومز (Benishangul-Gumuz) في أقصى شمال غرب إثيوبيا داخل حوض النيل الأزرق، على بعد حوالي ١٥ كم من الحدود الإثيوبية-السودانية، عند دائرة عرض 56° " ١٢' 11° شمالاً، وخط طول 31° " ٣٥' شرقاً، وعلى ارتفاع ٥٠٥ م فوق منسوب سطح البحر، وقد ساعد موقع المنطقة بالهضبة الإثيوبية في شرق القارة إلى

تأثرها بالمسطحات المائية والمناخ الموسمي شرقي القارة
(Kansara,et.al,2021).

ثانياً: الخصائص الطبيعية لمنطقة الدراسة:

١ - نوع الصخر والبنية الجيولوجية.

تعد هضبة إثيوبيا من الناحية الجيولوجية جزءاً من الصدع الإفريقي العظيم، الذي بدأ في نهاية العصر الكريتاسي، وأدى إلى تكوين البحر الأحمر والصدع الإثيوبي (McConnell 1972). تنتمي الصخور القديمة في حوض النيل الأزرق إلى صخور ما قبل الكامبري، والتي تشمل الكوارتزيت **Quartzite** والجرانيت **Granites** وأنواع الديوريت **Diorite** والبركانية المتحولة **Metavolcanics** (Wolela, 2012).

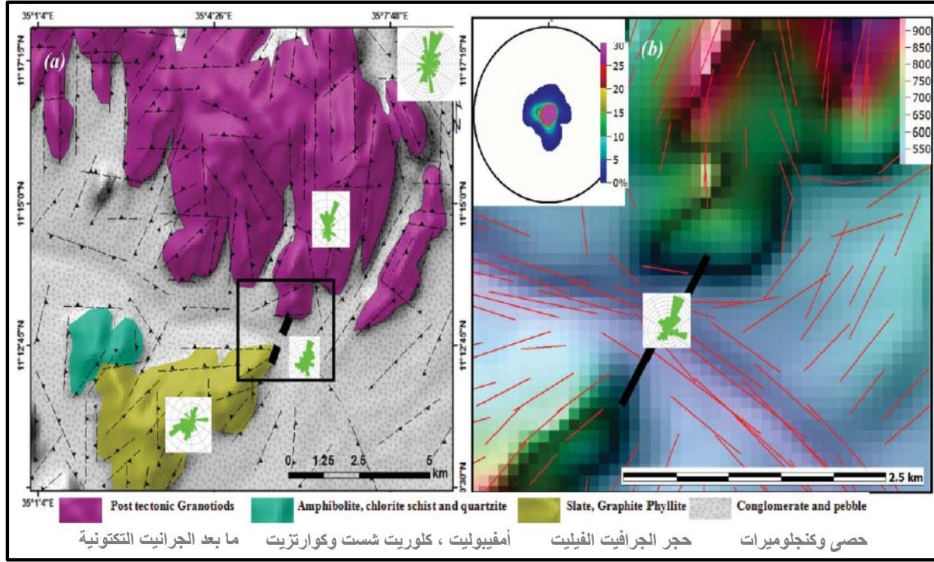
تتكون منطقة موضع سد النهضة عامة من صخور نارية، تقع أسفل طبقة الحجر الرملي النوبي، حيث توجد الصخور البركانية والمتصدعة في نطاق الجبال المحيطة بموضع السد (Kazmin 1972). تقع الصخور الجرانيتية (الجرانيت والديوريت) في الجزء الشمالي من موقع السد. كما توجد الصخور المتحولة مثل الكلوريت **Chlorite** والأمفيبوليت **Amphibolite** والشست والتلك **Talc, Schist** والصخور الرسوبية مثل الكنجلوميرات والحجر الرملي في الجزء الجنوبي من موقع السد. (Dow, 1971).

تم تحليل الملامح البنوية لموضع سد النهضة من خلال التفسير البصري للخريطة الجيولوجية للمنطقة، وتحليل صور الأقمار الصناعية لنموذج الارتفاع الرقمي للقمم الصناعي (PALSAR) ونموذج الارتفاع الرقمي للمكوك الفضائي (SRTM) لموضع سد النهضة، ويوضح شكل (٣) التكوينات واللامح الجيولوجية

في موضع سد النهضة، حيث توجد العديد من الفواصل والصدوع، والتي تأخذ في شكلها عادة الاتجاهات الجغرافية (WNN- ESE) والاتجاه (NNW - SSE) والاتجاه (ENE-WSW)؛ وقد يكون لهذه الملامح الجيولوجية تأثيراً على الظروف الجيوتقنية لقاعدة بناء سد النهضة وبحيرة التخزين (Mohamed, 2017).

يتبين من شكل (٣) أن سد النهضة الإثيوبي يقع بين جبلين؛ حيث يبلغ ارتفاع الجانب الأيمن حوالي (١٤٠٠ متر) ويتكون من الصخور الحمضية acidic مثل الجرانيت granite، بينما يبلغ ارتفاع الجانب الأيسر حوالي (١١٠٠ متر) ويتكون من الصخور المتحولة مثل الكلوريت chlorite، الأمفيبوليت amphibolite، الشست schist، وتكوينات من الصخور الرملية، حيث تتسبب هذه التكوينات الجيولوجية غالباً في تسرب المياه والرمل والطين من خلال التشققات البينية لهذه الصخور؛ وبالتالي فإن معظم التكوينات الجيولوجية في موضع سد النهضة قابلة للتآكل، نتيجة لاحتوائها على ألواح الجرانيت التي تكثر بها الفواصل والشقوق.

وتشير البنية والتراكيب الجيولوجية من الصدوع والفواصل والشقوق إلى احتمالية حدوث نشاط زلزالي بعد نشأة بحيرة السد وضغط عمود المياه الناشيء على اليابس إضافة إلى شدة الانهيارات الصخرية وتساقط الصخور وزحف التربة وتدفق الطمي وتأثيره على السعة التخزينية للسد (عبد الحميد، ٢٠١٩).



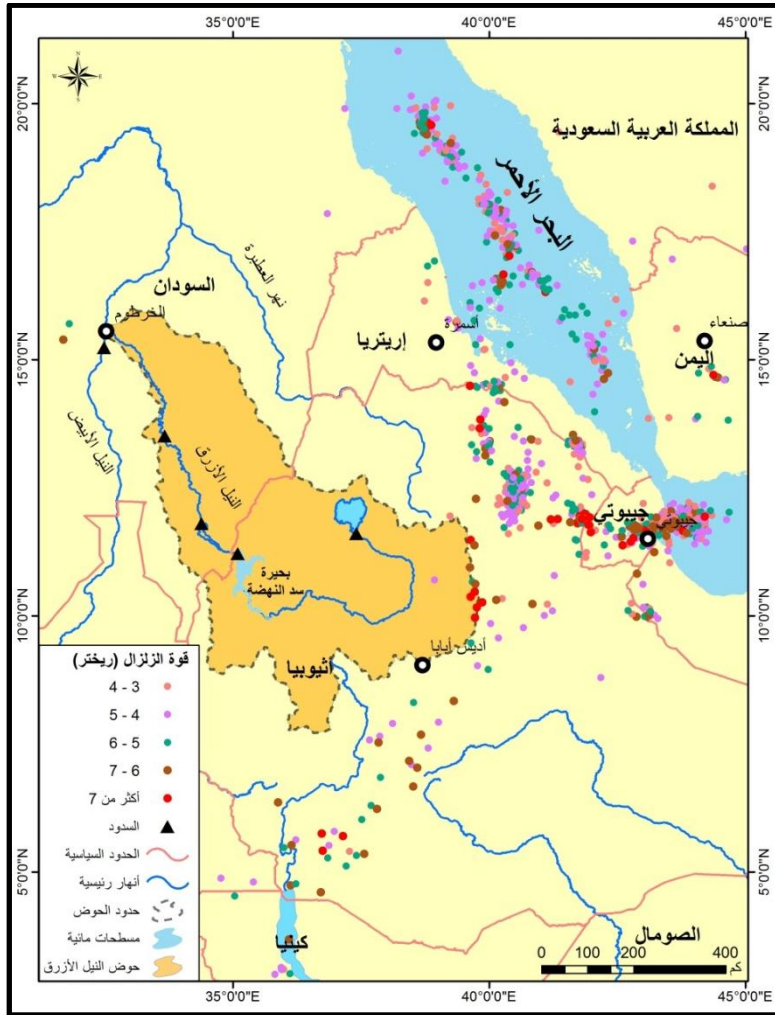
After: Mohamed and Elmahdy 2017.

شكل (٣) التكوينات الجيولوجية لموقع سد النهضة GERD.

وقد ينتج من بناء سد النهضة في مواضع الصدوع والفواصل الجيولوجية حدوث تسرب للمياه عبر هذه الشقوق والفواصل بالإضافة إلي زيادة الوقت المستغرق لملء خزان هذا السد؛ بالإضافة إلى مشكلات أخرى تتعلق بالزلازل وضغط المياه على الكتلة الصخرية النوبية والكتلة الصخرية الأفريقية.

٢- الأخطار الناتجة عن الزلازل.

يمثل تقييم أخطار الزلازل في إثيوبيا أهمية كبيرة في هذه الدراسة وذلك لتقييم الأحداث المتوقعة على المنطقة من أخطار الزلازل على سد النهضة، وتحديد مدى احتمال حدوثها، وتقييم الآثار المستقبلية التي قد تنتج من انهيار السد؛ وذلك من خلال تقييم الأحداث والنتائج السابقة لحدوث الزلازل في إثيوبيا وما يجاورها؛ وعامة يرتبط النشاط الزلزالي في إثيوبيا بمسار الصدع الأفريقي الذي يقسم إثيوبيا إلى جزأين ويرتبط به مواضع النشاط البركاني في المنطقة.



شكل (٤) التوزيع الجغرافي لقوة الزلازل بمنطقة الدراسة وما حولها في الفترة

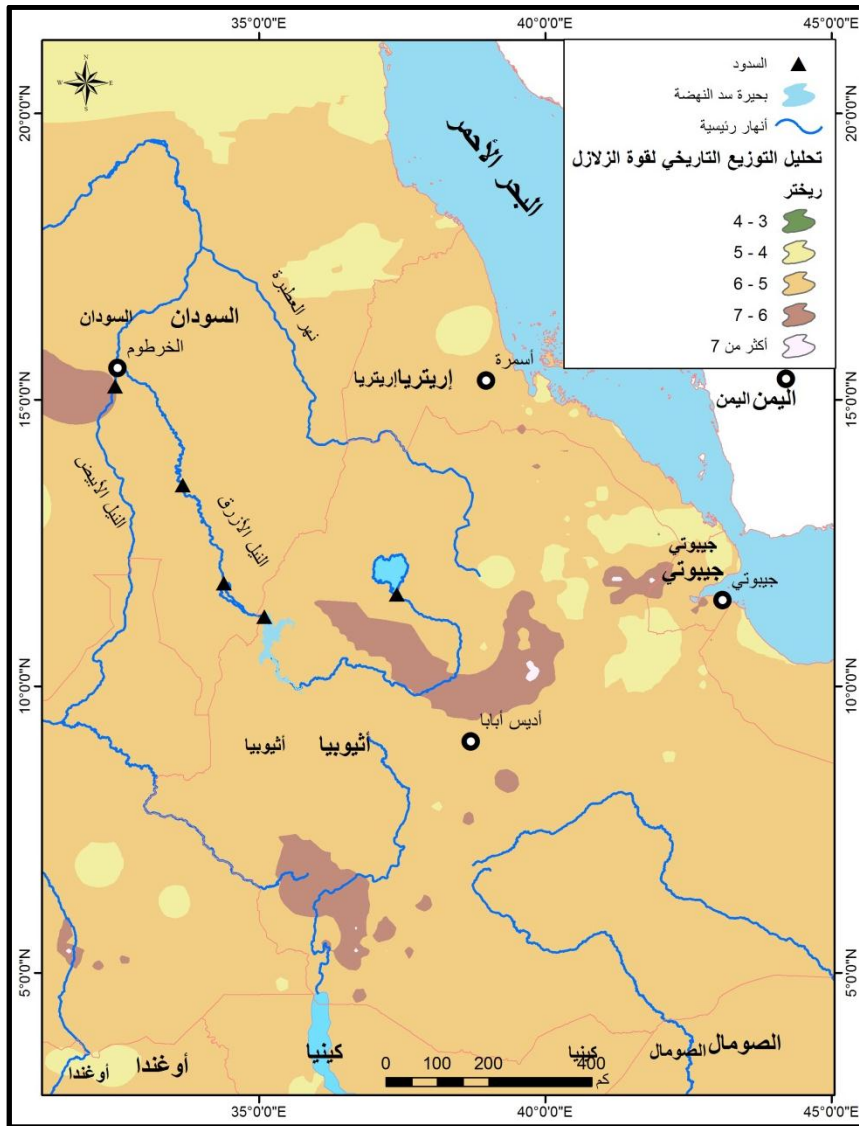
(١٩٥٠-٢٠١٠)

وتتأثر طبوغرافية دولة أثيوبيا بالصدوع حيث يقسمها أكبر دع على وجه الأرض وهو الأخدود الأفريقي العظيم مما تسبب في حدوث الزلازل المتكررة في دولة أثيوبيا وخصوصا في مثلث عفار وعلى أمتداد الأخدود وأدى ذلك بدوره إلى

كثرة الصدوع والتشققات في الصخور الأثيوبية ومن ثم حدوث الانهيارات الأرضية كما هو الحال في منطقة تيجاري شمال إثيوبيا (شراقي، ٢٠١٤).

وتبين من تحليل التوزيع الجغرافي لمواضع الزلازل وقوتها وعمقها في إثيوبيا ومنطقة شرق إفريقيا أنها تنحصر بين ٣: ٧ على مقياس ريختر، حيث حدث أكثر من ٣٥٠ زلزالاً في الفترة بين ١٩٥٠ حتى ٢٠١٩، منها ٢٧٤ زلزال ما بين ٣: ٥ على مقياس ريختر، وحوالي ٧٦ زلزالاً قوته بلغت أكثر من ٥ على مقياس ريختر؛ بالإضافة إلى الزلازل الأخرى التي نقل قوتها عن ٣ على مقياس ريختر والتي لم ترصد في مواقع تتبع الزلازل العالمية التابع لهيئة المساحة الجيولوجية الأمريكية كما يوضحه شكل (٤).

ويوضح شكل (٥) التحليل الجغرافي بأداة التحليل المكاني (IDW) لعدد مرات حدوث الزلازل في إثيوبيا بناءً على قوتها، حيث يوضح نطاق اللون البني في هذه الخريطة توزيع احتمالية حدوث الزلازل التي تبلغ قوتها ٦ درجات بناء على مواقع الزلازل التي حدثت بنفس القوة، حيث يظهر أن المنطقة التي تقع شمال سد النهضة قد تتعرض لأخطار الزلازل بقوة ٦ على مقياس ريختر مما قد يكون له أثر مستقبلي على كفاءة التخزين في السد واحتمالية حدوث تصدعات في جدار السد نتيجة للزلازل المتوقعة بسبب أحمال تخزين المياه على المنطقة الصدعية. أما بالنسبة للمناطق التي تظهر باللون البرتقالي فإنها تمثل المناطق الجغرافية التي قد تتعرض لحدوث زلازل بقوة تقل عن ٥ على مقياس ريختر.



المصدر: عمل الباحثان إعتماًداً على بيانات هيئة المساحة الجيولوجية الأمريكية (١٩٥٠ - ٢٠١٩)

شكل (٥) التحليل الجغرافي لتكرار حدوث الزلازل في إثيوبيا بأداة التحليل المكاني

(IDW) بناءً على قوتها حسب مقياس ريختر

٣- الخصائص المناخية:

يعد معيار تساقط الأمطار هو العامل الرئيسي الذي يؤثر على النموذج الهيدرولوجي، حيث تم جمع وتحليل بيانات تساقط الأمطار من المحطات المناخية الموجودة في منطقة الدراسة؛ وتم التعرف على أقصى كميات للمطر وعدد الأيام المطيرة والمتوسط الشهري للأمطار، وقد وجد أن كمية الأمطار المتساقطة خلال أيام شهر أغسطس تتراوح بين (صفر، ١٥، ٣٠، إلي ٤٠ ملم) وبالتالي فقد تم وضع أكثر من سيناريو لحالة الحوض وكمية المياه الجارية عند تساقط أمطار في الأعماق المختلفة وهي (١٥ و ٣٠ و ٥٠ و ١٠٠ مم) وأمكن من ذلك التعرف على كمية الجريان وزمن التصريف لكل فئة من فئات سقوط الأمطار وتم التركيز على تحليل كمية الأمطار المتساقطة بمقدار ٣٠ مم. يعد موسمية سقوط الأمطار من أهم العوامل الطبيعية التي تسبب تدفق المياه من هضبة اثيوبيا إلى مصر بشكل موسمي من خلال الروافد الرئيسية لحوض النيل. ويتميز مناخ هضبة اثيوبيا (ومنها حوض النيل الأزرق) بتساقط الأمطار بغزارة خلال فصلي يوليو وأغسطس وقد تمتد فترة تساقط الأمطار حتى أكتوبر ونوفمبر من كل عام، وذلك نتيجة لموقع اثيوبيا في الإقليم الجغرافي شبه الاستوائي، ويتراوح إجمالي المعدلات السنوية لتساقط الأمطار في موقع السد حوالي ٨٦٠ ملم، وفي المناطق الجبلية المجاورة حوالي ٢٢٥٠ ملم^(٤).

اعتمدت هذه الدراسة على تحليل البيانات المناخية لمحطة ديبيرماركوس (Debre Marcos) وهي المحطة التي تتوسط الحوض الأعلى للنيل الأزرق، حيث تبين من تحليل جدول (١) أن المتوسط السنوي لكميات المياه اليومية

(٤) <https://power.larc.nasa.gov>

المتساقطة على المحطة عام ٢٠١٨ حوالي ١٥.٣ ملم/يوم وأن أقصى كمية مطر سقطت عليها ٤١ ملم خلال ٢٤ ساعة، ومن تحليل عدد الأيام المظيرة تبين أن الأمطار تتساقط لمدة ٣٠٩ يوم في السنة، لكن بنسب لا تولد الجريان فيما عدا شهري يوليو واغسطس وهما الشهران الذين تتساقط فيهما الأمطار بغزارة مما يتسبب في حدوث الجريان السطحي من خلال روافد النيل الأزرق.

وقد تم تحليل احتمالات سقوط الأمطار باستخدام برنامج (WMS) واعتمد في عملية تصميم توزيع الأمطار على نموذج النوع الثاني (TypeII-24hour) وهو نموذج لتمثيل كميات الأمطار الساقطة) على الحوض خلال ٢٤ ساعة والجريان السطحي المتراكم المرتبط بهذا التساقط، وهو نموذج يتم من خلاله افتراض أن رخات المطر تحدث كل ٦ دقائق، على مدار ٢٤ ساعة.

جدول (١) قيم سقوط الأمطار على محطة ديبيرماركوس في اثيوبيا عام ٢٠١٨

الشهر	متوسط الأمطار مم/يوم	أقصى كمية مطر	عدد الأيام المظيرة
يناير	٠.٢	٤.٣	٦
فبراير	٢.٤	١١.١	٢٠
مارس	٠.٤	٥.٠	٢٢
أبريل	٢.٦	١٩.٧	٣٠
مايو	٢.٢	٨.٦	٣١
يونيو	٦.٦	٦.٦	٣٠
يوليو	١١.٢	٢٧.٨	٣١
أغسطس	١١.٢	٤١.٠	٣١
سبتمبر	٤.٨	٢٧.١	٣٠
أكتوبر	٢.٩	١٤.٥	٢٨
نوفمبر	٣.١	١٨.١	٢٦
ديسمبر	٠.٣	٠.٣	٢٤
المتوسط السنوي	٤.٠	١٥.٣	٣٦٤/٣٠٩

<https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>, <http://www.ethiomet.gov.et/>

-تحليل احتمالية سقوط الأمطار لمدة ١٠٠ عام.

تمثل عملية التحليل التكرارى للأمطار اليومية القصوى لمنطقة الدراسة أهمية كبيرة حيث توضح ما قد تكون عليه شدة الأمطار خلال المائة عام القادمة بناء على أقصى كمية أمطار حدثت خلال الفترة الزمنية السابقة. يعتبر التحديد الدقيق لكميات الأمطار التي سقطت على الحوض المائي، من أهم العوامل التي تساعد على حسابات السيول المتجمعة من تلك الأمطار بشكل دقيق، كما تعتبر الأساس الصحيح للإحصائيات المائية واحتمالات تكرار السيول. ويساهم توزيع محطات قياس الأمطار والسيول بشكل سليم أو بيانات الأقمار الصناعية، في توفير المعلومات الموثوق بها والتي تغطي كامل المنطقة وتؤدي إلى تلافي الأخطاء في القراءات أو في التسجيل بين المحطات، ويعتبر عمق المطر (**Rainfall intensity**) هو العامل الرئيس والمؤثر على تكوين السيول والتي يجب أخذها في الاعتبار عند التخطيط للمشاريع الإنشائية والتنمية.

وقد تم إجراء التحليل الإحصائي لأقصى قيم للأمطار اليومية واستخدام التوزيعات الاحتمالية المختلفة واختباره للحصول على قيمة المطر في الأزمنة التكرارية المختلفة، وذلك من خلال الرجوع إلى سجلات محطات من موقع وكالة ناسا لمعلومات الفضاء^(٥) ومعرفة كثافة التساقط المطري وتحديد عمق المطر لفترات تكرارية مختلفة لكل من (٢- ٣ - ٥ - ١٠ - ٢٠ - ٥٠ - ١٠٠ سنة). وذلك باستخدام برنامج التحليل الإحصائي للأمطار (**HyfranPlus**) وتطبيق التوزيعات الإحصائية المختلفة. حيث تم تحليل بيانات محطة أرصاد

⁵ <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>

Debremarcos في اثيوبيا لعمق الامطار حيث تعتبر هذه المحطة المركز

الأوسط لمحطات الرصد المناخي للحوض الأعلى للنيل الأزرق.

جدول (٢) أقصى كمية أمطار سقطت خلال يوم واحد على محطة ديبرماركوس (٢٠١٨)

السنة	الشهر	اليوم	أقصى كمية مطر/يوم (مم)
٢٠٠٠	٧	٢٤	٣٥.١٨
٢٠٠١	٦	٣٠	٢٢,٨٩
٢٠٠٢	٦	٢٨	٤١,٦١
٢٠٠٣	٨	٨	٢٣,٧٩
٢٠٠٤	٤	٥	١٧.١٦
٢٠٠٥	٧	٢٩	٢٦,٨٣
٢٠٠٦	٦	٢٩	٣٥,٠١
٢٠٠٧	٧	٩	٢٧.٦٨
٢٠٠٨	٨	٣	٢٥,٠١
٢٠٠٩	١٠	١١	٢٦,٨٥
٢٠١٠	٨	٣	٢٨,٠٥
٢٠١١	٧	١٩	٢٣,٢٩
٢٠١٢	٧	١٧	٢٤,٦٤
٢٠١٣	٧	١٣	٤٩.١٣
٢٠١٤	٧	٣٠	٣٣,١٩
٢٠١٥	٦	٢٣	٣٩.١٨
٢٠١٦	٥	١٠	٦٢.٢٧
٢٠١٧	٧	٢٠	٨٦,١١
٢٠١٨	٨	١٤	٤٠.٩٥

After: <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>

تم توفير البيانات الخاصة بتساقط كمية الأمطار لمحطة أرصاد ديبرماركوس خلال الفترة من ٢٠٠٠ حتى ٢٠١٨، أي حوالي ١٩ سنة كما يوضحها جدول (١). ومن خلال تطبيق التوزيعات الاحتمالية المختلفة لمعلومات الأمطار في المحطة وجد أن توزيع ((log-Pearson type 3 (WRC) هو التوزيع الأنسب لهذه المعلومات، وبالتالي تم استخدامه لإجراء التحليل الاحتمالي لتحديد قيم عمق المطر بأزمنة تكرارية مختلفة، ومن التحليل وجد أن قيمة عمق

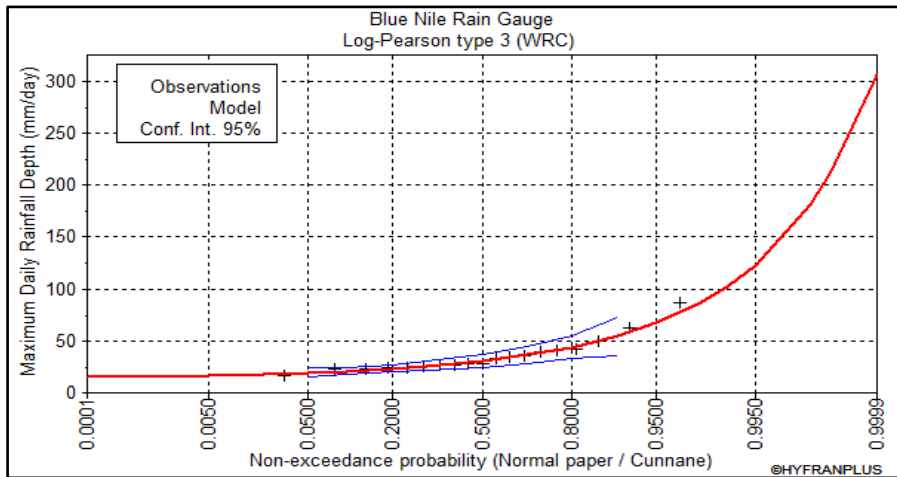
المطر لفترة تكرارية ١٠٠ عام هي ١٠٣ ملم، وأن احتمالية عمق المطر خلال ٥٠ عاما هو ٨٦ ملم، وخلال عامان هو ٣٠.٢ ملم، ويوضح شكل (٦) منحني

التوزيع الاحتمالي لبيانات المحطة بطريقة Pearson type 3 (WRC)

جدول (٣) التحليل الاحتمالي لتحديد قيم عمق المطر بطريقة Pearson type 3 (WRC)

التحليل الإحصائي	
أقل قيمة	١٧.٢
أقصى قيمة	٨٦.١
المتوسط	٣٥.٢
الانحراف المعياري	١٦.٤
الوسيط	٢٨.١
معامل الاختلاف (Cv)	٠,٤٦٥
معامل الانحراف (Cs)	١,٩٨

المصدر: عمل الباحثان اعتماداً على التحليل بطريقة Pearson type 3 (WRC) في برنامج HyfranPlus



المصدر: عمل الباحثان اعتماداً على التحليل بطريقة Pearson type 3 (WRC) في برنامج HyfranPlus والقيم في جدول (٢)

شكل (٦) منحني التوزيع الاحتمالي لبيانات محطة دبيرماركوس Debremarcos

لتحديد قيم عمق المطر بطريقة Pearson type 3 (WRC)

جدول (٤) نتائج التصحيح بطريقة Pearson type 3 (WRC) لمحطة أرصاد

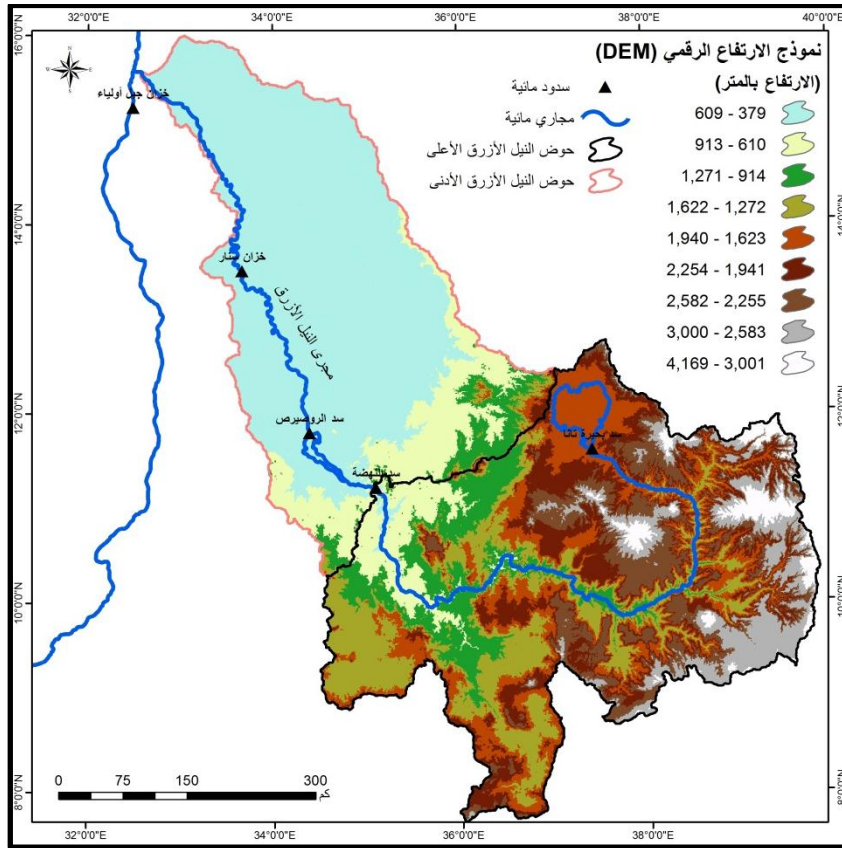
ديبرماركوس Debremarcos بالمليتر

الزمن التكراري بالسنوات	Q	XT كمية المطر المحتملة	الانحراف المعياري	معامل الثقة (95%)
١٠٠	٠,٩٩	١٠٣	٤٤,٩	N/D
٥٠	٠,٩٨	٨٦,١	٢٩,٨	N/D
٢٠	٠,٩٥	٦٧	١٦	N/D
١٠	٠,٩٠	٥٤,٧	٩,٤٧	٧٣,٣-٣٦,١
٥	٠,٨٠	٤٣,٨	٥,٦٤	٥٤,٨-٣٢,٧
٣	٠,٦٧	٣٦,٦	٤,١	٤٤,٦-٢٨,٥
٢	٠,٥٠	٣٠,٧	٣,١٧	٣٦,٩-٢٤,٤

المصدر: عمل الباحثان اعتماداً على التحليل بطريقة Pearson type 3 (WRC) بيرنامج HyfranPlus.

الخصائص الطبوغرافية:

تتكون تضاريس إثيوبيا من هضبة عالية تنقسم إلى جزئين نتيجة للصدع الإفريقي العظيم الذي قسم اثيوبيا إلى قسمين هما المرتفعات شمالية والجنوبية والتي تحيط بها الأراضي المنخفضة كما سبق الذكر، حيث يجري النيل الأزرق في الجزء الشمالي من الأراضي الإثيوبية. تلعب تضاريس هضبة اثيوبيا دورا فعالا في عملية سقوط الأمطار على الحوض الأعلى للنيل الأزرق، حيث تتباين ارتفاعات هضبة اثيوبيا بين ٦٠٠ م في المناطق المنخفضة على الحدود السودانية الإثيوبية وبين ٤٠٠٠ م في جبال وهضاب إثيوبيا الوسطى شكل (٧).



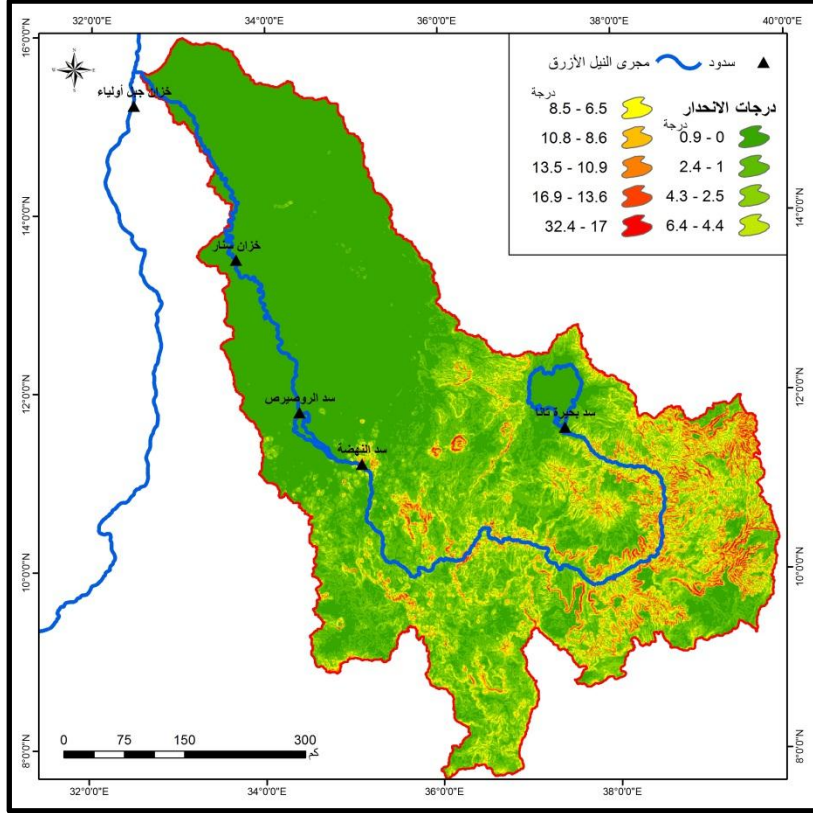
المصدر: نموذج الارتفاعات الرقمية SRTM لعام ٢٠٠١، www.earthexplorer.usgs.gov

شكل (٧) خريطة توضح الخصائص التضاريسية للحوض الأعلى للنيل الأزرق بالمتري

٤ - خصائص الانحدار:

يعد الانحدار من العوامل المؤثرة في حركة الجريان السطحي للمياه في الحوض الأعلى للنيل الأزرق، كما أنه يعد عاملاً من العوامل التي تؤخذ في الاعتبار عن إنشاء وتصميم السدود الجديدة ومنها اختيار موضع سد النهضة الحالي. وتنحصر درجات الانحدار في الحوض الأعلى للنيل الأزرق بين صفر إلى ٤٠ درجة حيث يزداد الانحدار في المناطق الجانبية للمجرى الرئيسي للنيل

الأزرق. وتنتصف مناطق المنحدرات بحدوث التساقط الصخري خاصة في الأودية الاخودية العميقة.



المصدر: نموذج الارتفاعات الرقمية SRTM لعام ٢٠٠١، www.earthexplorer.usgs.gov

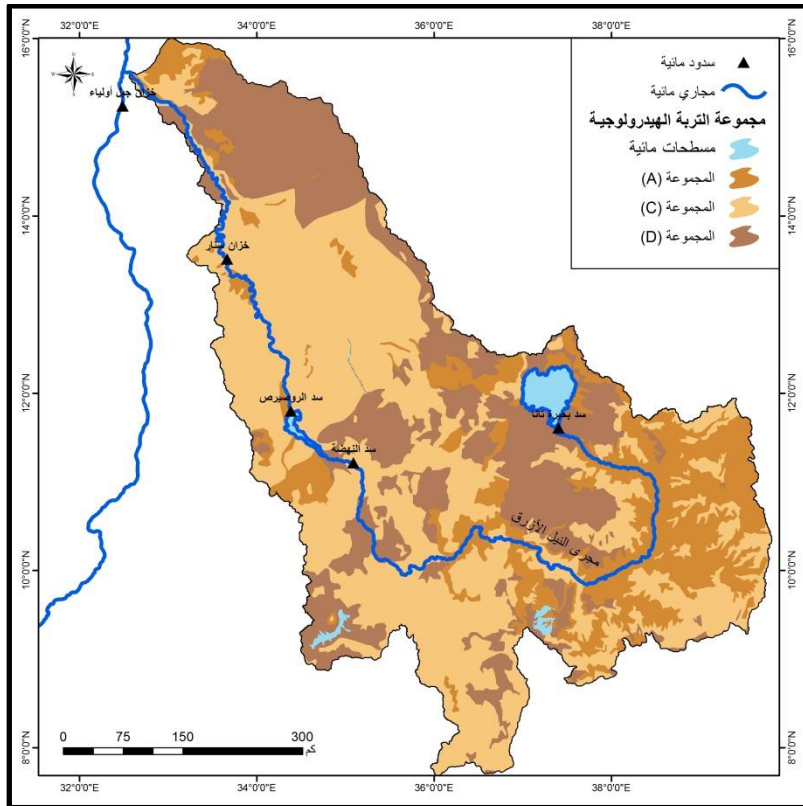
شكل (٨) خريطة توضح درجات الانحدار للحوض الأعلى للنيل الأزرق

٥- خصائص التربة:

تعد خصائص التربة ونوعيتها ضمن العوامل المؤثرة في حساب الخصائص الهيدرولوجية لأحواض التصريف المائي ببرنامج (WMS). فهي تدخل كأحد المعايير الأساسية لحساب CN وذلك لتعريف المجموعات الهيدرولوجية لاستخدامات التربة والأراضي، اعتماداً على طريقة SCS التي تحدد هيدرولوجية التربة بأربعة مجموعات أساسية حسب سرعة تدفق المياه وانفاذها داخلها، ويشار

لهذه المجموعات بـ (A-B-C-D)، ولكل منها خصائصها في الجريان السطحي، حيث تؤثر خصائص التربة على العلاقة بين تساقط الأمطار والجريان السطحي من خلال معدل التسرب. وتتمتع مجموعة التربة (D) بإمكانية تأثير عالية للجريان، بسبب معدلات تسربها البطيئة للغاية والتي تبلغ ١.٣ مم / ساعة (٠.٠٥٢ في الساعة)؛ والسبب في ذلك أنها تربة طينية تنتشع بالماء بسرعة مقارنة بباقي أنواع التربة. ومن أهم سمات التربة (D) هي أنها تتكون من أنواع ومنها: طميية طينية clay loam أو طميية رملية silty clay

clay أو طينية clay شكل (٩). <http://gsdm.ciat.cgiar.org/>



المصدر: بتصريف عن خرائط التربة من هيئة المساحة الجيولوجية الأمريكية USGS

شكل (٩) خريطة خصائص النفاذية للتربة في حوض النيل الأزرق

يختلف توزيع أنواع التربة ومساحتها في حوض النيل الأزرق لكل نوع من أنواع التربة حيث أن مجموعة التربة من نوع (A) تبلغ مساحتها حوالي ٤٩٨٦٠ كم^٢ وهي تربة ذات نفاذية عالية، بينما تغطي المجموعة (C) مساحة ٧٦١٨٤ كم^٢، وتغطي المجموعة (D) مساحة ٤٤٢٣٣ كم^٢ وهي ذات نفاذية متوسطة.

٦- بيانات استخدام الأراضي.

يمثل الغطاء الأرضي واستخدام الأرض أهمية في حساب معاملات تدفق المياه في النموذج الهيدرولوجي لحساب تدفقات المياه في حوض النيل الأزرق الأعلى باستخدام برنامج (WMS)، حيث أن كل نوع من الاستخدامات (LU) كود له قيمة تستخدم مع معيار هيدرولوجية التربة لحساب (CN) في طريقة (SCS).

وقد تم الاعتماد على تصنيف استخدام الأرض في حوض النيل الأزرق عند حساب قيمة (CN) والتي تعتمد على كود نوع الغطاء الأرضي وخصائص النفاذية للتربة ويتم في برنامج WMS استخدام منهجية SCS لحساب قيمة الفواقد وزمن التدفق لكل حوض فرعي وللحوض الرئيسي أيضاً.

تتنوع استخدامات الأرض والغطاء الأرضي في المنطقة بين الأراضي المفتوحة ومناطق الغابات والشجيرات المتوسطة والعالية بالإضافة إلى مناطق المستنقعات؛ حيث تتنوع الغطاءات الأرضية بين الغابات والحشائش التي تبلغ ارتفاعاتها (أكبر من ٥ أمتار)، وكذلك مناطق المراعي والأراضي الزراعية، وذلك كما توضحه خرائط هيئة المساحة الجيولوجية الأمريكية والتي تتوفر في خدمة خرائط برنامج (WMS).

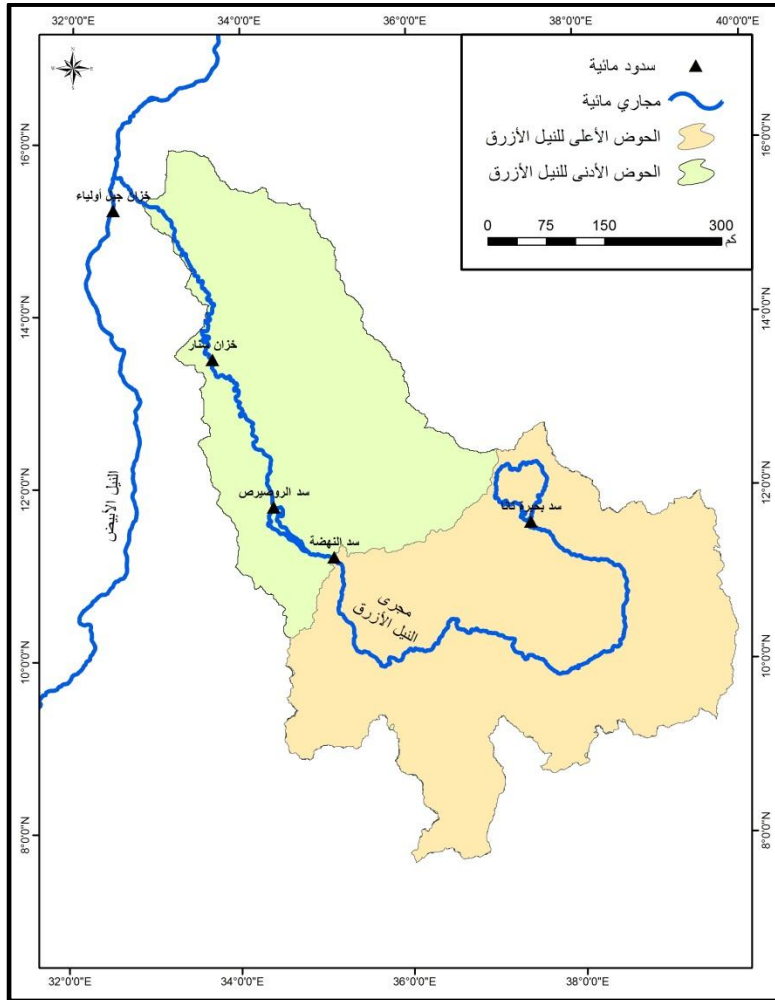
ثالثاً: التحليل الهيدرولوجي للمنطقة:

تبلغ مساحة حوض النيل ٣.١٨ مليون كم ٢، وهي تمثل ١٠٪ من مساحة القارة الأفريقية وتتقاسمه ١١ دولة. يضم حوض نهر النيل مجموعة واسعة من النظم الإيكولوجية التي تشمل الجبال والغابات الاستوائية والأراضي الرطبة العالية منها والمنخفضة، والبحيرات الاستوائية، والغابات، وحشائش السافانا. وتشمل هذه النظم الإيكولوجية النباتات والحيوانات الفريدة في شرق أفريقيا. غير أن معظم هذه النظم البيئية تعد مهددة بالتدهور البيئي الناجم عن تزايد عدد سكان المنطقة، والتوسع التنموي المستمر، وعدم كفاية الموارد المائية وسوء التعامل مع هذه الموارد البيئية (Abdelazim, 2017).

ويتميز حوض النيل ككل بتنوع مناخي، نتيجة لكبر مساحة الحوض وامتداده بين دائرتي عرض (٣١ شمالاً و ٦ جنوباً) وعلى الرغم من ذلك تسقط عليه نسبة قليلة من الأمطار، وتوزيع غير متساوي لموارده المائية. كما أنه تزيد به معدلات التبخر خاصة في منطقة السودان وبحر الجبل، مما يجعل الحوض عرضة للجفاف بشكل خاص.

يبلغ معدل كمية المياه المتدفقة للنيل الواصلة عند أسوان حوالي ٨٤.٤ مليار م^٣/سنة، ينقسم حوض النيل إلى حوضين رئيسيين: الأول هو البحيرات الاستوائية، وأمطارها طوال العام، ولا تساهم إلا بنسبة ١٥٪ من معدل تصريف السنوي للنيل، ولكنها مستقرة إلى حد ما؛ ومصدرها النيل الأبيض وتصرفاته؛ حيث تبلغ تصرفات المياه السنوية حوالي ٣٧.٧ مليار م^٣ (موزعة على بحيرة فكتوريا ٢٣.٤ ملياراً م^٣، ألبرت ٣ مليار م^٣، بحر الغزال ١١.٣ ملياراً م^٣) غير أن ما يصل للنيل الأبيض منها هو ١٤.٩ ملياراً م^٣ فقط، نتيجة لعملية التبخر

التي تحدث للمياه في منطقة السودان في بحر الجبل والتي تصل إلي ٢٢.٨ مليار م^٣؛ والمصدر الثاني هو حوض النيل الشرقي الموسمي والذي يسهم بنسبة ٨٥ ٪ من التدفقات السنوية للنيل، ولكن مساهمتها موسمية للغاية، ومصدر المياه النيل الأزرق بنسبة ٥٤ ملياراً م^٣، والسوبات ١٣.٥ ملياراً م^٣، وعطبرة ١٢ ملياراً م^٣ (Abdelazim, 2017)



المصدر: عمل الباحثان اعتماداً على نتائج التحليل الهيدرولوجي ببرنامج ArcGIS

شكل (١٠) خريطة توضح الأحواض الفرعية لحوض النيل الأزرق (الأعلى والأدنى)

تبلغ مساحة حوض النيل الأزرق حوالي ٣٠٧٧٤٥ كم^٢، يمكن تقسيمها إلى جزئين هما الحوض الأعلى للنيل الأزرق بروافده على الهضبة الإثيوبية ومساحته حوالي ١٧٤٨٢٩ كم^٢، وتبلغ مساحة الحوض الأدنى للنيل الأزرق بروافده (من مخرج سد النهضة حتى الخرطوم) الذي يخرج من حسابات التخزين لسد النهضة حوالي ١٣٢٩١٦ كم^٢. وتتراوح ارتفاعات حوض النيل الأزرق الأعلى بين (٢٠٠٠ و ٣٠٠٠ متر فوق مستوى سطح البحر) كما توجد قمم تصل إلى أكثر من ٤٠٠٠ متر. تبلغ كمية المياه التي سوف يتحكم فيها سد النهضة ٣٤ مليار متراً مكعباً وهي المياه التي تتدفق من الحوض الأعلى من النيل الأزرق أما المياه التي تتدفق إلى الحوض الأدنى خلف سد النهضة فمن أهم روافدها رافدي الرهد والدندر فتبلغ كميتها ٢٠ مليار متراً مكعباً من إجمالي ٥٤ مليار متراً مكعباً من المياه التي تتدفق من النيل الأزرق.

(أ) محاكاة التحليل الهيدروغرافي للحوض الأعلى:

يغذي المجرى الرئيسي لنهر النيل الأزرق مجموعة من الروافد التي تتبع من المرتفعات الإثيوبية، ويبلغ طوله من مخرجه في بحيرة تانا حوالي ٩١٦ كم وتبلغ مساحة الحوض حوالي ١٧٤٨٢٩ كم^٢، أي أنه يمثل ٥٦.٨ % من إجمالي مساحة حوض النيل الأزرق.

ينبع نهر النيل الأزرق من بحيرة تانا، ثم يتدفق إلى الجنوب الشرقي حتى يصل النهر إلى واد عميق بعد حوالي ١٥٠ كم من بحيرة تانا ثم يغير مساره إلى الجنوب، ويسير لمسافة ١٢٠ كم، ثم يغير النهر طريقه باتجاه الغرب حتى (الحدود الإثيوبية السودانية) ثم يسير غرباً وشمال غرب حتى الخرطوم (Conway, 2000).



المصدر: عمل الباحثان إعتتماداً على نتائج التحليل الهيدرولوجي ببرنامج (WMS)

شكل (١١) خريطة الأحواض الثانوية للحوض الأعلى للنيل الأزرق في اثيوبيا

تم في هذه الدراسة عمل محاكاة لسقوط الأمطار باحتماليات متعددة تمثل الواقع الحالي والمستقبلي في الحوض الأعلى للنيل الأزرق أمام سد النهضة بكميات تساقط مختلفة في اليوم وهي (١٥، ٣٠، ٥٠ ملم)، حيث اتضح من عملية التحليل بمحاكاة سقوط أمطار بمقدار ٣٠ ملم خلال ٢٤ ساعة، أن حجم التصريف المائي أو الجريان السطحي (Water Volumes) في الحوض الأعلى

للنيل الأزرق أمام سد النهضة سوف يبلغ حوالي ٠,٥٦٦ مليار متراً مكعباً/يوم، مع ذروة تصريف أو تدفق تبلغ ٢٣٧٠ م^٣ / ثانية في الحوض الأعلى للنيل الأزرق، أي بإجمالي (٣٣.٩٦ مليار متراً مكعباً) خلال شهري يوليو وأغسطس وهي تقترب من كمية المياه التي تتدفق سنوياً من المجرى الأعلى للنيل الأزرق إذا أضيف لها كمية المياه المتدفقة للحوض الأدنى للنيل الأزرق والتي تقدر بنحو ٢٠ مليار متراً مكعباً خلال شهري يوليو وأغسطس.

جدول (٥) تحليل محاكاة سقوط الأمطار على الحوض الأعلى للنيل الأزرق وأحواضه الثانوية

احتمالية سقوط أمطار بمقدار ٣٠ ملم/يوم			الحوض الأعلى للنيل الأزرق
إجمالي كمية المياه المتدفقة (م ^٣)	وقت التصريف بالدقيقة	قمة التصريف (م ^٣ /ث)	
٤٧٦٣٩١٤٤	١١٥٧	٣٣٠٠	دابوس
٤٠١٧٦٥٠٠	١١٠١	٢٧٩٠	بيليس
٩١٤٨٢١٩١	٢١٥٥	٣٥٢٥	ديديسا
٢٦٣٩٢٩٥٥	١١١٨	١٩٥٠	جودير
٢٤٠١٧٨٠٧	٩٣٥	٢٠٧٠	موجر
٤٧٧١٠٤٠٦	١٧٠٩	٢١٩٠	جيما
١٥٣٤٢١٥٢	٧٢٣	١٨١٥	ولاكا
٣٩٤١٥٣٣٨	١٧٨٦	١٨٦٠	بشيلو
١٩٦٤٤٤٩٤	٩٣٩	١٨٠٠	جنوب جوجام
٧٩٨٤٧٧٢٤	١٩٩٢	٣١٥٠	تانا
٥٦٦٢٦٥٢٠٣	١١٦٧٠	٢٣٧٠	المجرى الرئيسي

المصدر: عمل الباحثان باستخدام برنامج (WMS) ونموذج المحاكاه HEC-1

المقاطع العرضية للحوض الأعلى للنيل الأزرق وتغيراتها:

يظهر من جدول (٦) تحليل خصائص القطاعات النهرية في الحوض الأعلى للنيل الأزرق باستخدام برنامج (HEC-RAS) في فترتي (موسم الجفاف وفترة الفيضان)، أن هناك اختلاف في مساحة المقطع العرضي وخصائصه، حيث تبين من تحليل القطاعات ما يلي: -

- **المقطع الأول (أ):** يقع القطاع الأول عند الإحداثي $2^{\circ} 17' 35''$ شرقاً و $19^{\circ} 14' 11''$ شمالاً، حيث اتضح أن أقصى اتساع للمقطع العرضي للمجري المائي في هذه المنطقة يبلغ حوالي ٢١٣٥ م ، ومساحة المقطع العرضي يبلغ حوالي ١١٨٠٧ م^٢، ويبلغ أقصى عمق في المقطع العرضي حوالي ١٨.١ م ، ويبلغ معدل الانحدار 0.0013 متر/متر، في موسم الجفاف. أما في موسم الفيضان فقد يبلغ أقصى اتساع للمقطع العرضي للمجري المائي في هذه المنطقة حوالي ٩٤٠٠ متراً، ومساحة المقطع العرضي يبلغ حوالي ٨٣٧٢٩٣ م^٢، ويبلغ أقصى عمق في المقطع العرضي حوالي ١٢٦,٧ م.

- **المقطع الثاني (ب):** يقع القطاع الثاني عند الإحداثي $57^{\circ} 1' 35''$ شرقاً و $86^{\circ} 65' 10''$ شمالاً، حيث اتضح أن أقصى اتساع للمقطع العرضي للمجري المائي في هذه المنطقة يبلغ حوالي ١٧٨٧ م ، ومساحة المقطع العرضي يبلغ حوالي ١٦٢٨٤ م^٢، ويبلغ أقصى عمق في المقطع العرضي حوالي ٢٣.١ م ويبلغ معدل الانحدار 0.00035 م/م، في موسم الجفاف. أما في موسم الفيضان فقد يبلغ أقصى اتساع للمقطع العرضي للمجري المائي في هذه المنطقة حوالي ٧٠٩٨ م، ومساحة المقطع العرضي يبلغ حوالي ٣٦١٥٦٠ م^٢، ويبلغ أقصى عمق في المقطع العرضي حوالي ٩٣ م.

- **المقطع الثالث (ج):** يقع القطاع الثالث عند الإحداثي $79^{\circ} 66' 35''$ شرقاً و $49^{\circ} 94' 9''$ شمالاً، حيث اتضح أن أقصى اتساع للمقطع العرضي للمجري المائي في هذه المنطقة يبلغ حوالي ١٩٩ م، ومساحة

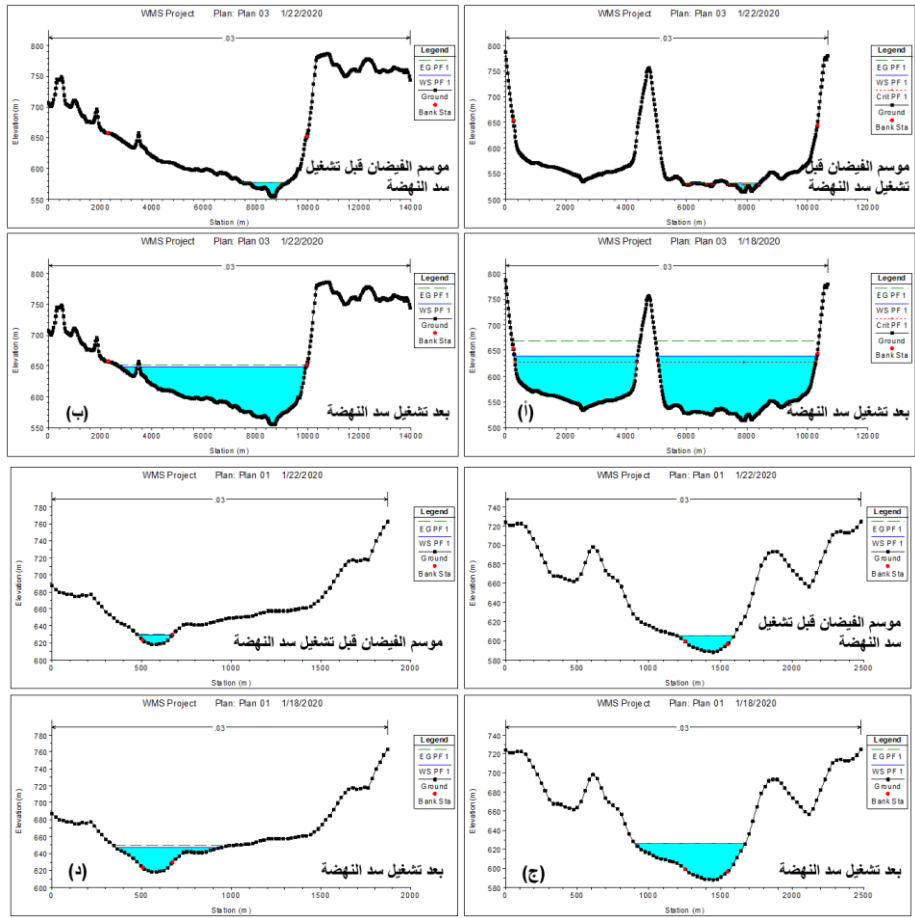
المقطع العرضي يبلغ حوالي ١٦٣٦ م^٢، ويبلغ أقصى عمق في المقطع العرضي حوالي ١١.٧م ويبلغ معدل الانحدار ٠.٠٠٠٠٥ متر/متر، في موسم الجفاف. أما في موسم الفيضان فقد يبلغ أقصى اتساع للمقطع العرضي للمجري المائي في هذه المنطقة حوالي ٥٧٩ متراً، ومساحة المقطع العرضي يبلغ حوالي ٧٢٥١ متراً مربعاً، ويبلغ أقصى عمق في المقطع العرضي حوالي ٢٨ متراً.

جدول (٦) خصائص المقاطع العرضية للحوض الأعلى للنيل الأزرق

رقم المقطع	الاحداثيات	المحاكاة	أقصى اتساع للمقطع (م)	مساحة المقطع (م ^٢)	معدل الانحدار (م/م)	أقصى عمق في المقطع (م)
(أ)	٣٥.١٧٢ شرقاً	المستوى المعتاد	٢١٣٥	١١٨٠٧	٠.٠٠٠١٣	١٨.١
	١١.١٤١٩ شمالاً	فترة الفيضان	٩٤٠٠	٨٣٧٢٩٣	٠.٠٠٠١٣	١٢٦.٧
(ب)	٣٥.١٥٧ شرقاً	المستوى المعتاد	١٧٨٧	١٦٢٨٤	٠.٠٠٠٠٣٥	٢٣.١
	١٠.٦٥٨٦ شمالاً	فترة الفيضان	٧٠٩٨	٣٦١٥٦٠	٠.٠٠٠٠٣٥	٩٣
(ج)	٣٥.٣٢١ شرقاً	المستوى المعتاد	٣٩٢.٨	٤٤٦٧	٠.٠٠٠٠٠٤	١٧.٤
	١٠.٢٦١٣ شمالاً	فترة الفيضان	٧٦٩.٥	١٧٠٩٤	٠.٠٠٠٠٠٨	٣٧.٩
(د)	٣٥.٦٦٧٩ شرقاً	المستوى المعتاد	١٩٩.٨	١٦٣٦	٠.٠٠٠٠٥	١١.٧
	٩.٩٤٤٩ شمالاً	فترة الفيضان	٥٧٩.٥	٧٢٥١	٠.٠٠٠٠٧	٢٨.٧
المتوسط		المستوى المعتاد	١١٢٨.٦٥	٨٥٤٨.٥	٠.٠٠٠٠٥٤٧٥	١٧.٦
		فترة الفيضان	٤٤٦١.٧٥	٣٠٥٧٩٩.٥	٠.٠٠٠٠٦٠٧٥	٧١.٥
الانحراف المعياري		المستوى المعتاد	٩٧٤.٧٥	٦٧٠.٥٦٥	٠.٠٠٠٠٥٣٧	٤.٦٧
		فترة الفيضان	٤٤٧٣.٧	٣٩٠.٧٥٨.٥	٠.٠٠٠٠٥٢٧	٤٦.٤٤

المصدر: عمل الباحثان اعتماداً على نتائج التحليل الهيدرولوجي ببرنامج (HEC-RAS)

- **المقطع الرابع (د):** يقع القطاع الرابع عند الإحداثي ٠.١ ° ٣٢ ٣٥ شرقاً و ١٣ ° ٢٦ ١٠ شمالاً، حيث اتضح أن أقصى اتساع للمقطع العرضي للمجري المائي في هذه المنطقة يبلغ حوالي ٣٩٢ م، ومساحة المقطع العرضي يبلغ حوالي ٤٤٦٧ م^٢، ويبلغ أقصى عمق في المقطع العرضي حوالي ١٧.٤ م، ويبلغ معدل الانحدار ٠.٠٠٠٠٠٤ م/م، في موسم الجفاف. أما في موسم الفيضان فقد يبلغ أقصى اتساع للمقطع العرضي للمجري المائي في هذه المنطقة حوالي ٧٦٩ متراً، ومساحة المقطع العرضي يبلغ حوالي ١٧٠٩٤ م^٢، ويبلغ أقصى عمق في المقطع العرضي ٣٧,٩ م.
- يظهر جدول (٦) قيمة المتوسط الحسابي للمقاطع النهرية في المستوى المعتاد ومستوى الفيضان، فقد بلغت قيمة المتوسط لمساحة المقطع ٦٧٠٥,٦ للمستوى المعتاد، ٣٠٥٧٩٩ في مستوى الفيضان، وبلغت قيمة المتوسط لأقصى عمق في المقطع ١٧,٦ للمستوى المعتاد وبلغت ٧١,٥ في مستوى الفيضان.
- أما بالنسبة للانحراف المعياري للمقاطع النهرية في المستوى المعتاد ومستوى الفيضان، فقد بلغت قيمة للانحراف المعياري لمساحة المقطع ٩٧٤ للمستوى المعتاد، وبلغت ٤٤٧٣ في مستوى الفيضان، وبلغت قيمة للانحراف المعياري لأقصى عمق في المقطع ٤.٧ للمستوى المعتاد وبلغت ٤٦ في مستوى الفيضان.



المصدر: عمل الباحثان اعتماداً على نتائج التحليل الهيدرولوجي ببرنامج (HEC-RAS)

شكل (١٢) المقاطع العرضية للحوض الأعلى للنيل الأزرق

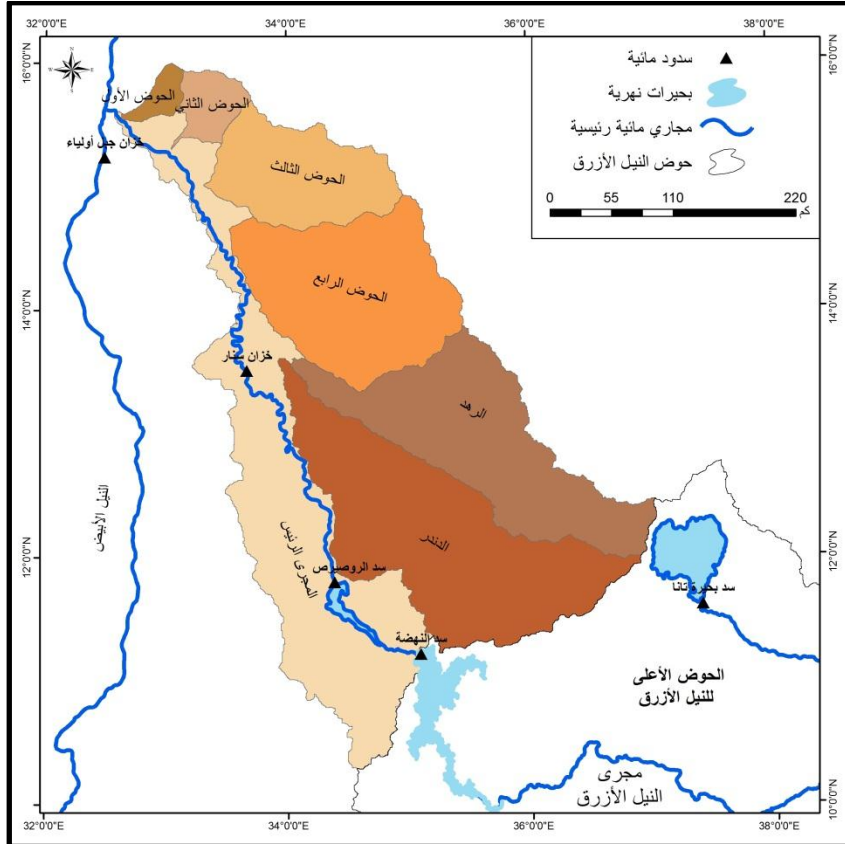
(ب) محاكاة التحليل الهيدروغرافي للحوض الأدنى:

تبين من خلال المحاكاة بسقوط أمطار بمقدار ٣٠ ملم خلال ٢٤ ساعة على الحوض الأدنى للنيل الأزرق أن حجم التصريف المائي في الحوض الأدنى للنيل الأزرق خلف سد النهضة سوف يبلغ ٤٢٦٦٦ مليون م^٣، مع ذروة تدفق تبلغ ٦٢٤ م^٣ / ثانية في الحوض الأدنى للنيل الأزرق خلف سد النهضة، والذي تغذيه عدة روافد أهمها الرهد والندندر.

جدول (٧) تحليل محاكاة سقوط الأمطار على الحوض الأدنى للنيل الأزرق

احتمالية سقوط أمطار بمقدار ٣٠ م/يوم			روافد الأحواض الثانوية للحوض الأدنى للنيل الأزرق
إجمالي كمية المياه المتدفقة (م ^٣)	وقت التصريف بالدقيقة	قمة التصريف (م ^٣ /ث)	
٤٥٠٢٢٤٦	٣٩٦٠	١٨.١	الحوض الأول
٩٥٩٢٣٠.٨	٤٦٨٠	٣١.٦	الحوض الثاني
٣٩٩٩٨٤١٩	٨٦٤٠	٣٦	الحوض الثالث
٧٣٢٢٧١٥٤	١٠٣٢٠	٩٥.٨	الحوض الرابع
٧٦٧٤٧٩٤٦	٥٦٤٠	٢٠٠	حوض الرهد
١٠٠٦٤٥٢٥٨	٦٦٠٠	٢١٥	حوض الدندر
٤٢٦٦٦٧٨٣١	٧٠٨٠	٦٢٤.٥	حوض النيل الأزرق الأدنى

المصدر: عمل الباحثان باستخدام برنامج (WMS) ونموذج المحاكاة HEC-1



المصدر: عمل الباحثان باستخدام برنامج (WMS)

شكل (١٣) الحوض الأدنى للنيل الأزرق وأحواضه الثانوية

(نمذجة المحاكاة الهيدرولوجية والهيدروليكية لتقييم أثر سد النهضة الإثيوبي...) د. ناصر عبد الستار - د محمد الراوي.

المقاطع العرضية للحوض الأدنى للنيل الأزرق.

يتبين من تحليل جدول (٨) خصائص المقاطع النهرية في الحوض الأدنى للنيل الأزرق باستخدام برنامج (HEC-RAS) في فترتي (موسم الجفاف وفترة الفيضان)، وأن هناك اختلاف في مساحة المقطع العرضي وخصائصه، حيث تبين من تحليل القطاعات ما يلي: -

- **المقطع الأول (أ):** يقع المقطع الأول عند الإحداثي $72^{\circ} 17' 35''$ شرقاً، و $19^{\circ} 14' 11''$ شمالاً، حيث اتضح أن أقصى اتساع للمقطع العرضي للمجري المائي في هذه المنطقة يبلغ ٩١٦ متراً، ومساحة المقطع العرضي يبلغ ٣٩٩٩ متراً مربعاً، ويبلغ أقصى عمق في المقطع العرضي ٧.٩ متراً، ويبلغ معدل الانحدار 0.0002 م/م، في موسم الجفاف. أما في موسم الفيضان فقد يبلغ أقصى اتساع للمقطع العرضي للمجري المائي في هذه المنطقة حوالي ١٢٩٠ م، ومساحة المقطع العرضي يبلغ حوالي ٩٨٦٤ متراً مربعاً، ويبلغ أقصى عمق في المقطع العرضي حوالي ١٨.٨ م.

- **المقطع الثاني (ب):** يقع المقطع الثاني عند الإحداثي $82^{\circ} 52' 32''$ شرقاً، و $13^{\circ} 6' 15''$ شمالاً، حيث اتضح أن أقصى اتساع للمقطع العرضي للمجري المائي في هذه المنطقة يبلغ حوالي ٥٦٤ م، ومساحة المقطع العرضي يبلغ حوالي ٢٧١٦ م^٢، ويبلغ أقصى عمق في المقطع العرضي حوالي ١٧.١٥ م، ويبلغ معدل الانحدار 0.00024 م/م، في موسم الجفاف، أما في موسم الفيضان فقد يبلغ أقصى اتساع للمقطع العرضي للمجري المائي في هذه المنطقة حوالي ١٦٢١ م، ومساحة المقطع

العرضي يبلغ حوالي ١١٠١٩ م^٢، ويبلغ أقصى عمق في المقطع العرضي حوالي ١٧.١٥ م.

- **المقطع الثالث (ج):** يقع المقطع الثالث عند الإحداثي ٩٨ ° ٣٢ ٥٣ شرقاً و ٥٥ ° ٦١ ١٥ شمالاً، حيث اتضح أن أقصى اتساع للمقطع العرضي للمجري المائي في هذه المنطقة يبلغ حوالي ٤٦٠ متراً، ومساحة المقطع العرضي يبلغ حوالي ٢٨٩٨ م^٢، ويبلغ أقصى عمق في المقطع العرضي حوالي ١٧.١٥ م، ويبلغ معدل الانحدار ٠.٠٠٠٠١٥ م/م، في موسم الجفاف. أما في موسم الفيضان فقد يبلغ أقصى اتساع للمقطع العرضي للمجري المائي في هذه المنطقة حوالي ١٢٥١ م، ومساحة المقطع العرضي يبلغ حوالي ٩٨٤١ م^٢، ويبلغ أقصى عمق في المقطع العرضي حوالي ٢٠.٧ م.

- **المقطع الرابع (د):** يقع المقطع الثالث عند الإحداثي ٢٥ ° ٣٢ ٥٩ شرقاً و ٣٣ ° ٥٧ ١٥ شمالاً، حيث اتضح أن أقصى اتساع للمقطع العرضي للمجري المائي في هذه المنطقة يبلغ حوالي ٧٢٠ م، ومساحة المقطع العرضي يبلغ حوالي ٣١٨٧ م^٢، ويبلغ أقصى عمق في المقطع العرضي حوالي ٩.١ م، ويبلغ معدل الانحدار ٠.٠٠٠٠١٣ م/م، في موسم الجفاف. أما في موسم الفيضان فقد يبلغ أقصى اتساع للمقطع العرضي للمجري المائي في هذه المنطقة حوالي ١٢٦٠ م، ومساحة المقطع العرضي يبلغ حوالي ٩٣٣٨ م^٢، ويبلغ أقصى عمق في المقطع العرضي حوالي ٢٠.١ م.

جدول (٨) خصائص المقاطع العرضية للحوض الأعلى للنيل الأزرق في حالة انهيار السد.

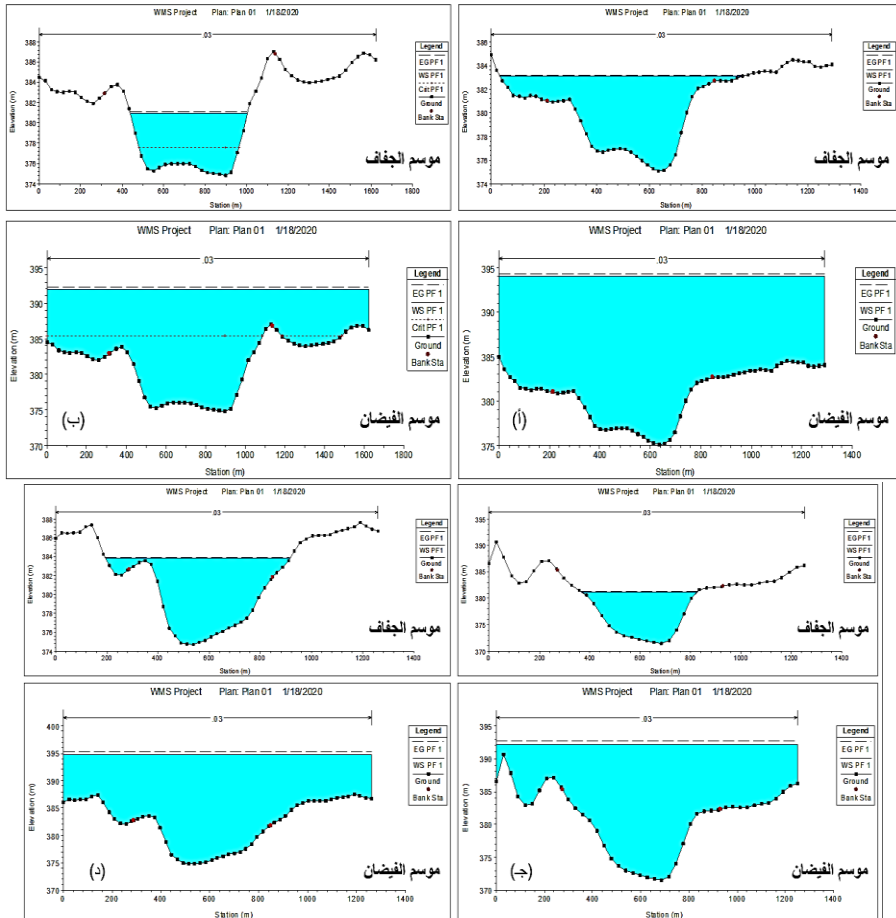
رقم المقطع	الاحداثيات	المحاكاة	أقصى اتساع للمقطع (م)	مساحة المقطع (م ^٢)	معدل الانحدار (م/م)	أقصى عمق في المقطع (م)
(أ)	٣٢.٥٨٠٧ شرقاً	المستوى المعتاد	٩١٦	٣٩٩٩	٠.٠٠٠٢	٧.٩٧
	١٥.٦١٥٨ شمالاً	فترة الفيضان	١٢٩٠	٩٨٦٤	٠.٠٠٠٢	١٨.٨
(ب)	٣٢.٥٢٨٢ شرقاً	المستوى المعتاد	٥٦٤	٢٧١٦	٠.٠٠٠٢٤	٦.١٨
	١٥.٦١٣ شمالاً	فترة الفيضان	١٦٢١	١١٠١٩	٠.٠٠٠٢٤	١٧.١٥
(ج)	٣٢.٥٣٩٨ شرقاً	المستوى المعتاد	٤٦٠	٢٨٩٨	٠.٠٠٠١٥	٩.٧٤
	١٥.٦١٥٥ شمالاً	فترة الفيضان	١٢٥١	٩٨٤١	٠.٠٠٠٣	٢٠.٧
(د)	٣٢.٥٩٢٥ شرقاً	المستوى المعتاد	٧٢٠	٣١٨٧	٠.٠٠٠١٣	٩.١
	١٥.٥٧٣٣ شمالاً	فترة الفيضان	١٢٦٠	٩٣٣٨	٠.٠٠٠٢٢	٢٠.١
المتوسط		المستوى المعتاد	٦٦٥	٣٢٠٠	٠.٠٠٠١٨٢٥	٨.٢٥
		فترة الفيضان	١٣٥٥.٥	١٠٠١٥.٥	٠.٠٠٠٢٢٥	١٩.٢
الانحراف المعياري		المستوى المعتاد	١٩٨.٥٤	٥٦٦.٨٧	٠.٠٠٠٠٣٥	١.٥٦
		فترة الفيضان	١٧٧.٧٨	٧١١.٦٧	٠.٠٠٠٠٥	١.٥٧

المصدر: عمل الباحثان إتماداً على نتائج التحليل الهيدرولوجي ببرنامج (HEC-RAS)

- يظهر جدول (٦) قيمة المتوسط الحسابي للمقاطع النهرية في المستوى المعتاد ومستوى الفيضان، فقد بلغت قيمة المتوسط لمساحة المقطع ٣٢٠٠م للمستوى المعتاد، ١٠٠١٥م في مستوى الفيضان. وبلغت قيمة المتوسط

لأقصى عمق في المقطع ٨.٢٥ للمستوى المعتاد وبلغت ١٩.٢ م في مستوى الفيضان.

أما بالنسبة للانحراف المعياري للمقاطع النهرية في المستوى المعتاد ومستوى الفيضان، فقد بلغت قيمة للانحراف المعياري لمساحة المقطع ٥٦٦ م للمستوى المعتاد، وبلغت ٧١١ م في مستوى الفيضان. وبلغت قيمة للانحراف المعياري لأقصى عمق في المقطع ١.٥٦ للمستوى المعتاد وبلغت ١.٥٧ في مستوى الفيضان.



المصدر: عمل الباحثان اعتماداً على نتائج التحليل الهيدرولوجي ببرنامج (HEC-RAS1)

شكل (١٤) شكل وأبعاد المقاطع العرضية للحوض الأدنى للنيل الأزرق أثناء الفيضان وفي حالة حدوث انهيار لسد النهضة

نمذجة المحاكاة الهيدرولوجية والهيدروليكية لتقييم أثر سد النهضة الإثيوبي... د. ناصر عبد الستار - د محمد الراوي.

رابعاً: الآثار والنتائج الجيومورفولوجية لتشغيل السد:

يمثل تشغيل سد النهضة الإثيوبي أحد العوامل التي سوف تحدث تغيرات جيومورفولوجية في حوض النيل الأزرق من منابعه حتى المصب، لعل أهم هذه التغيرات والملاحم الجيومورفولوجية (١) ظهور جزر واختفاء أخرى (٢) غمر المجرى للسهل الفيضي أما السد (٣) تكوين بحيرة صناعية تشبه في نشأتها بحيرة السد العالي في مصر (٤) ظهور تغيرات في المقطع العرضي للمجرى النهري (٥) تغير شكل المجرى النهري (٦) ظهور الخلجان النهريّة، ويمكن إيجاز أهم هذه التغيرات في الآتي: -

١- تكوين بحيرة سد النهضة:

لعمل محاكاة لبحيرة سد النهضة تم استخدام صورة القمر الصناعي (RapidEye) ونموذج الارتفاع الرقمي من المكوك الفضائي (SRTM) ومنه تم تحديد موقع سد النهضة والخصائص التضاريسية حوله، حيث أن بحيرة سد النهضة الإثيوبية تشبه بحيرة السد العالي في مصر، وكلاهما عبارة عن مياه محتجزة أمام السدود ومكونة بحيرات صناعية أدت إلى تغيرات جيولوجية ومورفولوجية في المنطقة.

ويتم بناء سد النهضة الإثيوبي على مجرى النيل الأزرق بالقرب من الحدود الأثيوبية السودانية، وصمم هذا السد بارتفاع ١٥٥ م من سطح الأرض، و يبلغ ارتفاع الأرض التي قرر البناء عليها حوالي ٥٠٠ م من سطح البحر، وسوف ينتج من بناء هذا السد تكوين بحيرة مائية ضخمة تمتد ما بين خطي كنتور ٥٠٠ م و ٦٤٥ م فوق منسوب سطح البحر، وسوف يبلغ طول هذه البحيرة

حوالي ٢٠٠ كم من موضع السد حتى نهاية خط كنتور ٦٤٥ متراً على امتداد مجرى النيل الأزرق عند التقائه مع رافد ديديسا باتجاه المنبع. وقد بلغ تقدير متوسط عرض المجرى النهري الحالي في موضع بحيرة سد النهضة حوالي ٣٣٦ م وبلغ أقصى عرض للمجرى ٧٤٤ م ويبلغ أقل عرض للمجرى النهري حوالي ٦٥ م في بعض المناطق الخانقية التي يضيق فيها المجرى، ويوجد داخل مجرى النيل الأزرق مجموعة من الجزر النهريّة التي تختلف في أحجامها ومساحاتها؛ نظراً لشدة الانحدار واندفاع المياه والطبيعة الجيولوجية للمجرى، وتتحرك هذه الجزر سنوياً مع حركة المياه داخل المجرى النهري، حسب قوة الفيضان السنوي في النيل الأزرق. وسوف تغمر هذه الجزر بالمياه عند تشغيل سد النهضة وامتلاء موضع البحيرة وهذا يمثل تغيراً مورفولوجياً جوهرياً على طول محور امتداد هذا المجرى النهري.

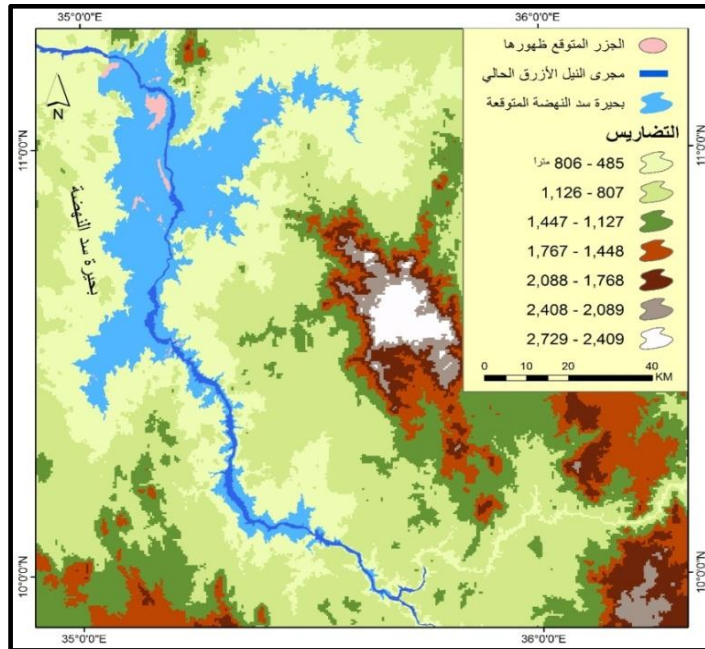
كما يمكن أن يؤدي إنشاء هذا السد إلى تغيرات جيومورفولوجية بالمنطقة، حيث يتكون من تخزين المياه أمام سد النهضة الأثيوبي بحيرة مائية بطول ٢٠٠ كم أي بنحو ٤٠٪ من طول بحيرة السد العالي في مصر والسودان، ومتوسط عرضها حوالي ٤٠ كم وسوف يصل أقصى عرض للبحيرة حوالي ٨٨ كم وأقل عرض حوالي ٥ كم في السنوات الأولى لتكوينها، بالإضافة إلى غرق الكثير من الجزر النهريّة وتغمر بالمياه وتصبح أشبه بالحوجز النهريّة المغمورة تحت سطح مياه القناة النهريّة، وكذلك المجرى النهري للنيل الأزرق بطول ٢٠٠ كم.

التغيرات في الجزر النهريّة:

تبين من تحليل الموضع الجغرافي لبحيرة سد النهضة الأثيوبي بعد امتلائها؛ غرق المجرى والجزر النهريّة الحالية وظهور جزر جديدة كانت في

الأصل عبارة عن تلال وقمم لمرتفعات لن يتبقى منها سوى قممها مكونة جزر نهريّة جديدة تقع داخل البحيرة الجديدة تختلف أحجامها وأبعادها حسب منسوب المياه في البحيرة. وهي المرتفعات التي يزيد ارتفاعها عن منسوب المياه المتوقعه في البحيرة والتي تقع على ارتفاع ٦٤٥ م فوق سطح البحر بين جانبي بحيرة سد النهضة حديثة النشأة.

وسوف يظهر في وسط بحيرة سد النهضة مجموعات متنوعة من الجزر الصخرية وتصبح جزراً جديدة تغمرها المياه من جميع جوانبها، وأغلبها ستكون صغيرة المساحة حيث تتراوح مساحاتها ما بين ١٨٣٩٣ م^٢ و ٦ كم^٢، ويبلغ عددها حوالي ٧٧ جزيرة فيما عدا جزيرة واحدة والتي تبلغ مساحتها حوالي ٢٧ كم^٢ وهي تظهر في وسط البحيرة أمام سد النهضة مباشرة.

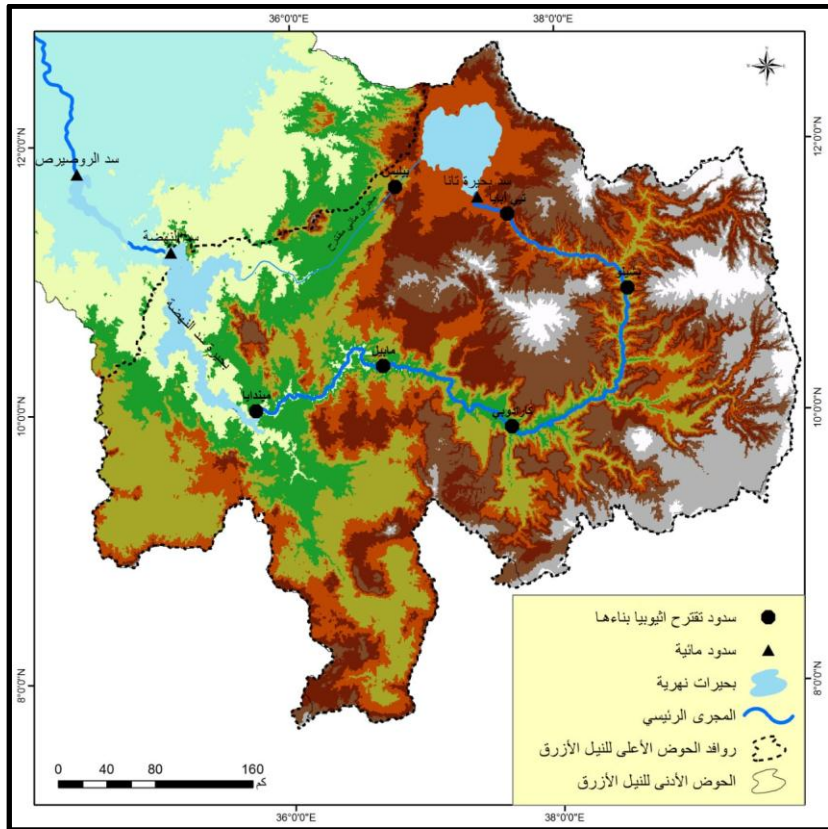


المصدر: نموذج الارتفاعات الرقمية AW3D 30m، www.eorc.jaxa.jp/ALOS/

شكل (١٥) خريطة بحيرة سد النهضة

خامساً: محاكاة انهيار سد النهضة:

بدأ العمل في سد النهضة الإثيوبي عام ٢٠١٢، وأصبح المشروع الرئيسي في خطة إثيوبيا لزيادة إمدادات الكهرباء بمقدار خمسة أضعاف وستبلغ طاقتها حوالي (٦٠٠٠ ميجاوات) وسعة الخزان (٧٤.٥ مليار م^٣) وهو ضعف سعة بحيرة تانا، ويمتد السد على جزء من النيل الأزرق في منطقة "بينيشقول-جومز (Benishangul-Gumuz)، وعند الانتهاء سيكون السد أكبر محطة لإنتاج الطاقة الكهرومائية في إفريقيا. هناك أيضاً خطط لبناء ستة سدود إضافية على النيل الأزرق كما هو موضح في شكل (١٦).



After: Abdelazim, 2017

شكل (١٦) السدود المقترحة على النيل الأزرق

ويعد سد النهضة الإثيوبي الكبير (GERD)، الواقع على نهر النيل الأزرق بالقرب من الحدود السودانية جزءًا أساسيًا من خطة موسعة لإنشاء مجموعة من السدود على النيل الأزرق، حيث سوف يكون هذا السد أكبر منتج للطاقة الكهرومائية في كل إفريقيا؛ غير أن هذا السد له آثار هيدرولوجية كبيرة على دول المصب (مصر والسودان)؛ وذلك لسعته التخزينية الضخمة ٧٤ مليار م^٣ من المياه والتي سوف يحتاجها عند البدء في عملية التخزين وملء الخزان.



After: <https://www.planet.com/explorer/>: 13-7-2019

شكل (١٧) صورة فضائية لسد النهضة الإثيوبي وموضعه وخصائصه المكانية العامة

١- السعة التخزينية لسد النهضة:

يحتاج حساب السعة التخزينية لخزان السد إلى العديد من البيانات التي تحدد تقريبًا مكان البحيرة وارتفاعها وحجمها وعمقها (أي قياس الأعماق)، حيث تم وضع سيناريوهات لارتفاعات المياه أمام السد وشكل البحيرة وخصائصها الناتجة عن التخزين أمام السد ومساحتها؛ وذلك من خلال تفسير صورة القمر الصناعي (Rapideye) التي أخذت بتاريخ ٢٠ يوليو ٢٠١٩. وتحليل نموذج الارتفاع

الرقمي (AW3D) حيث تم عمل محاكاة لطبوغرافية المنطقة والأشكال الجيومورفولوجية في البحيرة الناتجة عن التخزين.

تتراوح تضاريس منطقة سد النهضة بين ٥٠٠ م - ١٧٧٧ م حيث تتميز المنطقة بشدة تضاريسها وضيق السهول الفيضية بالقرب من موقع بناء السد، ويتوقع من التخزين أمام السد أن يصل عمق المياه في البحيرة المتوقعة إلى ١٠٠ متر تقريباً في المسار الرئيسي للنيل الأزرق؛ خاصة بعد إنشاء سد السرج (السد المكمل لسد النهضة) الذي يغلق المنطقة المنخفضة على الجانب الغربي من النيل الأزرق للسد مما يساعد في توسع السعة التخزينية للسد، حيث أنه سوف تبلغ مساحة البحيرة حوالي ٧٤٥ كم^٢.

جدول (٩) محاكاة ارتفاع مناسيب الأرض في موضع بحيرة سد النهضة وكمية المياه

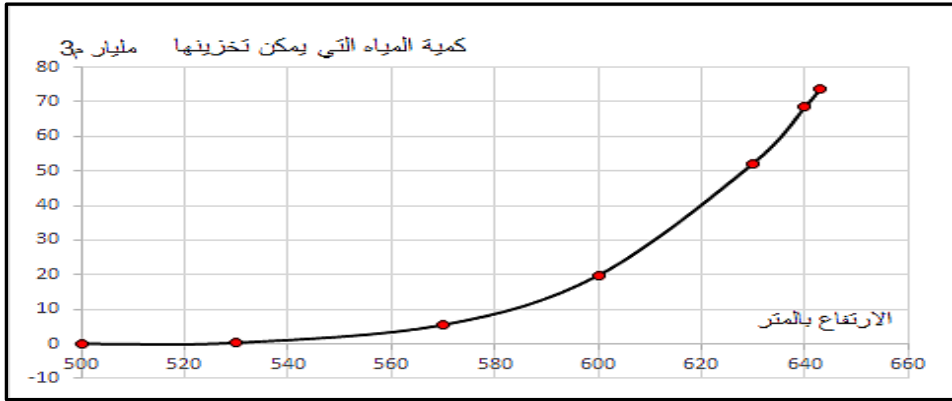
المتوقع تخزينها

الارتفاع فوق سطح البحر بالمتر	كمية المياه التي يمكن تخزينها (مليار م ^٣)
٦٤٣	٧٣.٨
٦٤٠	٦٨.٤
٦٣٠	٥٢.٢
٦٠٠	١٩.٨
٥٧٠	٥.٥
٥٣٠	٠.٣٣
٥٠٠	٠.٠٠٣٤

المصدر: عمل الباحثان اعتماداً على نموذج الارتفاعات الرقمية 30m AW3D، وبرنامج ArcGIS

يوضح شكل (١٨) محاكاة ارتفاع مناسيب الأرض في موضع بحيرة سد النهضة وكمية المياه المتوقعة تخزينها عند كل منسوب، حيث يمكن تخزين ٥ مليار متراً مكعباً عند منسوب ٥٧٠ متراً فوق سطح البحر (أي عند ارتفاع منسوب المياه بنحو ٧٠ متراً أمام السد)، أما في حالة التخزين حتى منسوب

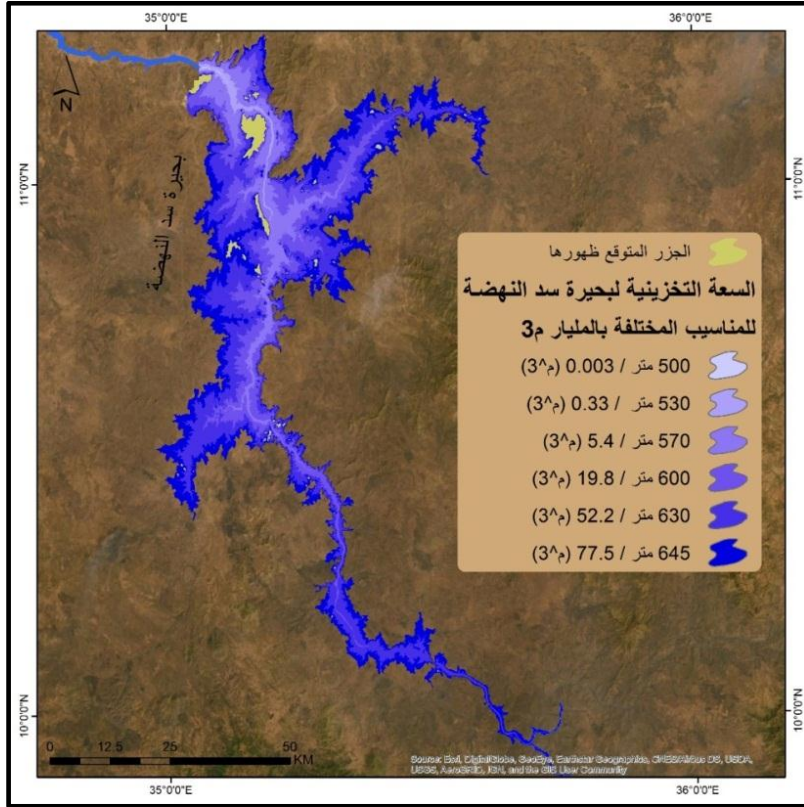
٦٤٠ متراً فوق سطح البحر فيمكن تخزين نحو ٦٨ مليار متراً مكعباً من المياه في بحيرة سد النهضة، وتصل أقصى قدرة استيعابية للتخزين عند منسوب ٦٤٣ متراً فوق سطح البحر والتي يمكن عندها تخزين ٧٣.٧ مليار متراً مكعباً من المياه في بحيرة سد النهضة.



المصدر: عمل الباحثان إعتياداً على نتائج جدول (٩).

شكل (١٨) منحنى العلاقة بين الارتفاع وكمية المياه التي يمكن تخزينها أمام سد النهضة

وأوضح من تحليل القدرة الاستيعابية لبحيرة سد النهضة المتوقعة جدول (٩) وشكل (١٩) أن السد غير مؤهل لاستيعاب كميات المياه الجارية في حالة استمرار تساقط الامطار على أعالي النيل الازرق بمقدار ١٠٠ ملم بشكل دائم يومياً لمدة ٣٠ يوماً. ولكن يمكنه استيعاب كميات المياه الجارية في حالة تساقط أمطار بمقدار ٥٠ ملم لمدة شهر فقط. أما في حالة استمرار التساقط لفترة زمنية تزيد عن شهر فلا يمكن استيعاب كميات المياه وتخزينها ويجب تصريف المياه والتوازن بين المخزون والفائض.



المصدر: عمل الباحثان اعتماداً على تحليل نموذج الارتفاعات الرقمية AW3D 30m، وبرنامج ArcGIS

شكل (١٩) التوزيع المكاني للعلاقة بين منسوب البحيرة وسعة التخزين لكل منسوب (مليار م^٣)

ويوضح جدول (١٠) حجم تدفق المياه م^٣ بناء على كمية تساقط الأمطار بمحاكاة سقوط أمطار بمقدار ١٥ ، ٣٠ ، ٥٠ ، ١٠٠ مم/يوم على التوالي على الحوض الأعلى للنيل الأزرق؛ وبالتالي يمكن حساب كمية المياه التي قد تتدفق في حالة استمرار تساقط الأمطار بنفس الكميات السابقة خلال شهر وذلك للتعرف على كمية المياه الجارية التي يمكن أن تجري في مجرى النيل الأزرق وتتدفق حتى تصل إلي سد النهضة.

جدول (١٠) محاكاة تدفق المياه أمام سد النهضة بناء على كمية المطر اليومي والشهري

كمية الأمطار (ملم)	حجم التدفق (م ^٣ /يوم)	حجم التدفق (م ^٣ /شهر)
١٥	٥٦٧.٨٣٢	١٧٠.١٢٤٩٦٠
٣٠	٥٦٦٢٦٥٢.٣	١٦٩٨٧٩٥٦.٩٠
٥٠	٢٢٣٨٧٦٢.٧٨	٦٧١٦٢٨٦٢٣.٤٠
١٠٠	٨٤٩٢٥٨٥.٤٨	٢٥٤٧٧٧٥٥١.٤٤٠

المصدر: عمل الباحثان باستخدام برنامج (WMS)

٢- احتمالية انهيار السد:

تشير العديد من الدراسات إلى احتمالية حدوث انهيار في سد النهضة نتيجة لعوامل جيولوجية أو حركات تكتونية نتيجة للصدع الإفريقي العظيم، أو للسعة التخزينية الضخمة للمياه على منطقة صدعية نشطة كما سبق الذكر في خصائص المنطقة (Mohamed and Elmahdy 2017)؛ مما قد يكون له أثر كبير على مظهر الحياة في المناطق التي تقع خلف السد والسدود الأخرى التي تقع خلفه بالاتجاه نحو المصب مثل سدي (الروصيرص وسنار).

تختلف الأخطار المتوقعة من بناء سد النهضة مقارنة بالسد العالي والذي بني من صخور مكدسة فوق بعضها في طبقات، مما يعطي قوة للسد وسلامة للسد العالي في العامل البنائي، مقارنة بسد النهضة الذي بني من الخرسانة والتي قد تتأثر بالتصدع عند حدوث زلازل في موضعها.

ويعتبر سد النهضة سداً آمناً على إثيوبيا مقارنة بدولة مثل السودان التي تقع عاصمتها عند مصب النيل الأزرق الذي يقام عليه السد وتلاقيه بالنيل الأبيض،

مما قد يؤدي إلى اختفاء وغمر عمران مدينة الخرطوم في حالة انهيار السد وتدفق مياهه باتجاه النيل الأبيض، حيث تقع مدينة الخرطوم على منسوب ٣٨٠ متراً فوق سطح البحر، وبالتالي قد تغرق الخرطوم وتغمرها المياه بعمق ١٢ متراً تحت سطح المياه المتجمعة في مجرى النيل الأبيض.

وتكمن خطورة انهيار سد النهضة على السودان في أنه سوف تتكون بحيرة تغطي حوالي ٢٦٨٢٣ كم^٢ بين دولتي السودان على طول محور النيل الأبيض، حيث تغمر المناطق العمرانية والزراعية والتي تقع على جانبي المجرى من الجنوب إلى الشمال.

٣- حالة انهيار السد:

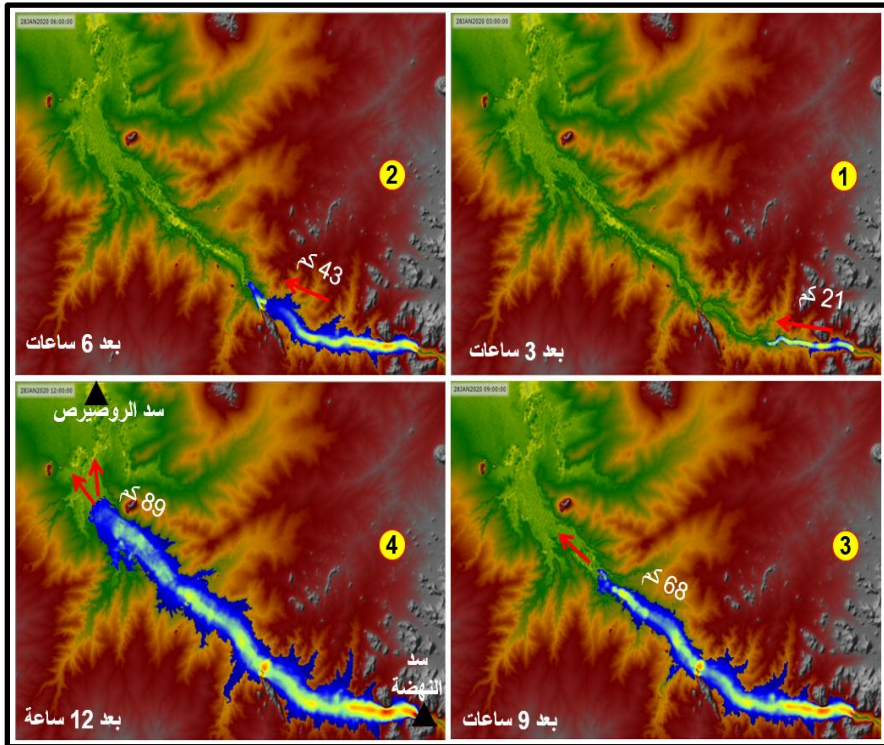
يعد الأمر الأكثر صعوبة في محاكاة انهيار السد هو عملية محاكاة ذروة الفيضان الناتج عن انهيار السد وتدفق المياه المتجمعة في البحيرة أمام السد في شكل فيضان وهنا نجد أنه من الصعب التنبؤ بالخصائص الهيدرولوجية للفيضان مثل ذروة التصريف (Peak discharge) ومستوى المياه (River stage) وحجم الفيضان وسرعة التدفق المائي أو زمن الرحلة (Travel time) لموجة الفيضان.

تمثل دراسات محاكاة انهيارات السدود نموذجاً توضيحياً يظهر حجم الكوارث الناتجة من هذه الانهيارات مما يعطي نظرة لما قد تكون عليه المدن التي تقع خلف السدود. فقد اقترحت دراسة (Al-Taiee, & Rasheed, 2009) محاكاة لانهايار سد الموصل في العراق بموجة تصريف قدرها ٢٠٧٦٣٢ م^٣/ثانية، وفي دراسة الجرمه عام ٢٠١٧ للسد العالي تم عمل محاكاة لموجة تصريف بمقدار (٣٦٥١٦٠ م/ث)، أما هذه الدراسة فقد افترضت محاكاة سرعة وموجة الفيضان

من انهيار سد النهضة بتصريف حوالي (٢٩٠٠٠٠٠٠ م^٣/ث) أي أكثر من عشرة أضعاف، وكانت النتائج كالتالي: -

- قدر أن سرعة المياه في المجرى النهري خلف سد النهضة حوالي ٧ كم/الساعة للموجة الأولى؛ وبعد ثلاث ساعات تقطع المياه مسافة تبلغ ٢١ كم وبعد الساعة السادسة تكون المياه قد وصلت إلى مسافة ٤٣ كم. أما بعد تسع ساعات تكون قد وصلت موجة المياه إلى مسافة ٦٨ كم من مخرجها خلف سد النهضة كما يوضحها شكل (٢٠) الذي يوضح تطورها المكاني وانتقالها باتجاه المصب.

- اتضح من تحليل سرعة الفيضان أن متوسط سرعة المياه بلغ ٧ كم/س.



شكل (٢٠) محاكاة انهيار سد النهضة وموجة الفيضان الناتجة عن الانهيار.

- تبلغ المسافة بين سد النهضة ومنطقة خانق سبلوكة حوالي ٩٤٦ كم أي أن المياه سوف تصل إلي خانق سبلوكة خلال خمسة أيام ونصف وهي منطقة مضيق تمثل صمام يحجز المياه خلفه نحو المنبع لوجود منطقة جبلية على جانبي الخانق.

- تبلغ المسافة من خانق سبلوكة حتى بحيرة السد العالي حوالي ١٤٣٦ كم أي أن المياه سوف تصل إلي جنوب بحيرة ناصر خلال ٨ أيام ونصف وأن المياه قد تصل إلي الحدود الجنوبية لمصر بعد ١٤ يوماً من اندفاعها من سد النهضة.

كما تم في هذه الدراسة عمل محاكاة لحالة انهيار السد باستخدام التقنيات الحديثة والبيانات التي تم توفيرها، وتم تحديد السعة التخزينية لسد النهضة والسدود التي تقع خلفه، حيث تبلغ السعة التخزينية لسد النهضة ٧٤ مليار م^٣ من المياه، والسعة التخزينية لسد الروصيرص ٧.٤ مليار م^٣ من المياه، وسد سنار ٣٩٠ مليون م^٣، أي أن إجمالي كمية المياه المتدفقة سوف تبلغ حوالي ٨٢ مليار م^٣ في شكل فيضان موجي أو موجة فيضان كبيرة.

وفي مواجهة ذلك قدر بأنه تبلغ القدرة التخزينية لبحيرة السد العالي نحو ١٦٤ مليار م^٣، والسعة التخزينية لبحيرات منخفض توشكى ٩٨ مليار م^٣ عن خط كنتور ١٧٠ م فوق سطح البحر، وتبلغ القدرة الاستيعابية لبحيرات توشكى عند منسوب ١٨٠ م فوق سطح البحر حوالي ١٥٠ مليار م^٣؛ علماً بأن أقصى تدفق للمياه من مياه بحيرة السد العالي ٩٥٠ مليون م^٣ يومياً نحو المصب ومن مفيضه ٣٣٠ مليون م^٣/يوم، ويبلغ أقصى تدفق للمياه إلي ترعة مفيض توشكى

حوالي ٣٠٠ مليون م^٣ من المياه يومياً، والقدرة التشغيلية لمحطة طلبات ترعة الشيخ زايد ٢٠ مليون م^٣ من المياه يومياً. أي أنه يمكن تصريف حوالي ١٦٠٠ مليون م^٣ يومياً (وزارة الموارد المائية والري).

وهكذا فإنه يمكن احتواء كمية المياه المتدفقة باتجاه الحدود الجنوبية لمصر. علماً بأن كمية المياه المتدفقة إلى مصر محكومة بكمية التصريف عبر مناطق الجندل، حيث يمكن أن يصرف خانق سبلوكة يومياً حوالي ٢٠٢١ مليون م^٣/يوم في حالة ارتفاع المياه أمامه منطقة الخانق بمقدار ٥٢ م وبسرعة ١ م/ثانية وتم ذلك قياساً باستخدام برنامج (SMS) وبرنامج (HEC-RAS).

٤- الحالة الهيدرولوجية لمنطقتي خانق سبلوكة والنيل الأبيض:

تبين من تحليل صور الأقمار الصناعية ونماذج الارتفاعات الرقمية عند مخرج النيل الأزرق بالقرب من مدينة الخرطوم والمجرى المائي عند الجندل السادس (خانق سبلوكة) وطبوغرافية النيل الأبيض جنوب الخرطوم؛ أنه في حالة تدفق المياه من سد النهضة في المجرى الرئيسي باتجاه السودان ومصر؛ سوف تعترض عملية تدفق المياه باتجاه الشمال منطقة صخرية خانقية ضيقة جداً ذات جوانب صخرية يبلغ ارتفاعها ما بين ٣٤٨ م و ٥٥٠ م عن مستوى البحر وعرضها ٤٥٠ م والتي تسمى منطقة خانق سبلوكة (الجندل السادس)؛ وبالتالي فإن تدفق المياه سوف يكون بطيئاً ومحكوماً بعرض وعمق المجرى الضيق وسرعة التدفق؛ مما قد يؤدي إلى بطئ السرعة وحجز المياه وارتدادها ورفع مستوى المياه في مجرى النيل الأبيض، كما يظهر من التحليل الهيدروليكي ببرنامج (HEC-RAS).

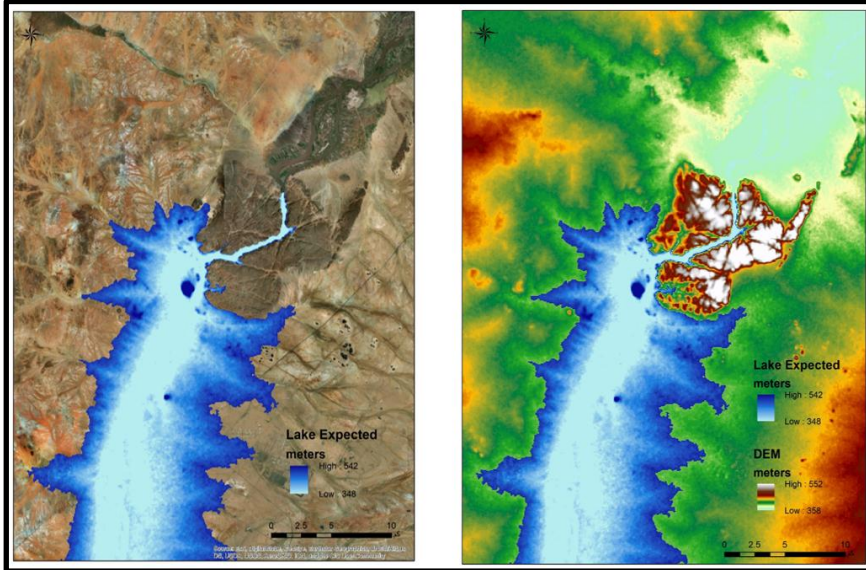
وأوضح من تحليل نموذج الارتفاع الرقمي بين (الخرطوم وملكال جنوباً عند بدايات النيل الأبيض) أن هذه المنطقة كانت عبارة عن بحيرة قديمة سميت باسم بحيرة السد (Ball, J., 1939)، وهذا يعني أن المياه سوف تغمر السهل الفيضي للنيل الأبيض ومدينة الخرطوم لانخفاض المنسوب، وأنه سوف تتحرك المياه نحو الجنوب عكس حركة جريان مجرى النيل لتماماً مجرى النيل الأبيض وستغمر الخرطوم (العاصمة المثلثة) ومجرى النيل الأبيض لأن منطقة الجنادل في النيل النوبي منطقة ضيقة ومعدل سرعة المياه فيها يكون ضعيفاً.

وبالتالي يتبين من التحليل السابق أن كمية المياه المتدفقة من سد النهضة سوف تغمر الملامح البشرية القريبة من مخرج النيل الأزرق والقطاع الأدنى له وصولاً للجنادل السادس (خانق سبلوكة) وستراجع المياه ويرتفع منسوبها باتجاه الجنوب في النيل الأبيض حتى مدينة ملكال ويمكن أن تكون بحيرة كبيرة يبلغ اتساعها ٢٦٨٢٣ كم^٢ مجرى خليجي الهيئة بمحور طولي ٧٥٠ كم ومتوسط عرضها ٤٠ كم. ويبلغ عدد القرى والمدن المعرضة للغرق ٣٥٨ مدينة وقرية تم احصائها على طول امتداد جانبي النيل الأبيض بمساحة ١٤١٥ كم^٢.

(أ) الوضع الهيدرولوجي في خانق سبلوكة.

يقع خانق سبلوكة على مسافة ٩٠ كم من مدينة الخرطوم، وهو عبارة عن حاجز صخري يعيق مجرى النيل ويحكم تدفق المياه باتجاه الشمال طبقاً لمساحة المقطع العرضي وسرعة المياه، في حالة انهيار سد النهضة سوف تتدفق كمية مياه باتجاه سد الروصيرص بسعة تخزينية ٧,٤ مليار م^٣، ثم خزان سنار بسعة تخزينية ٣٩٠ مليون م^٣ أي أن إجمالي كمية المياه المنحدرة في حالة انهيار سد

النهضة الأثيوبي حوالي ٨٢ مليار م^٣ من المياه، وسوف تواجه تدفق المياه حاجزاً صخرياً طبيعياً وهو الجندل السادس (خانق سبلوكة) الذي يبلغ اتساع المجرى فيه ٤٥٠ م كما سبق الذكر ويبلغ ارتفاع مكوناته الصخرية حوالي ٥٥٠ م ومنسوب قاع المجرى الأدنى ٣٤٨ م فوق سطح البحر شكل (٢١).

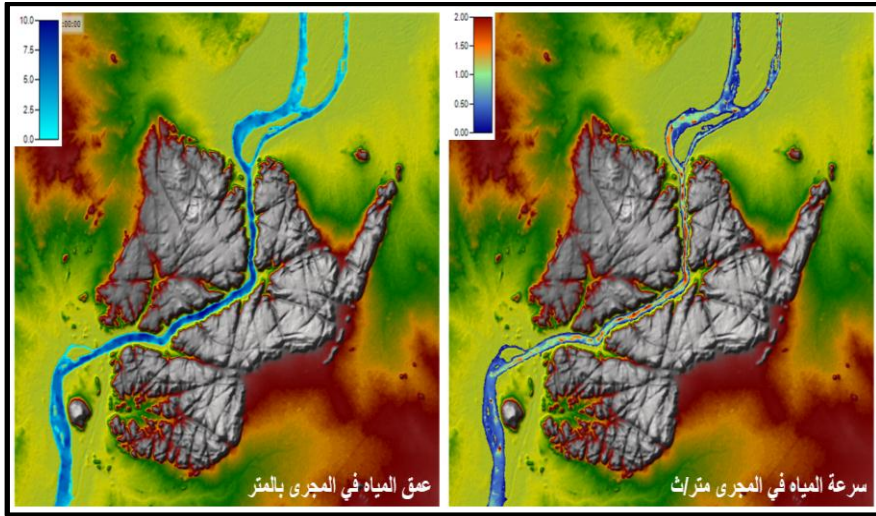


المصدر: عمل الباحثان إعتماًداً على نموذج (HEC-RAS) ونتائج النمذجة الهيدرولوجية HEC-1 شكل (٢١) طبوغرافية منطقة خانق سبلوكة والهيئة الخليجية للمياه المتجمعة في شكل بحيرة طولية

تبين من تحليل شكل (٢٢) والذي يوضح عمق المياه في المجرى في منطقة خانق سبلوكة وسرعتها واتجاه حركة المياه وتدفعها في المجرى وبين الضفتين، حيث اتضح ما يلي: -

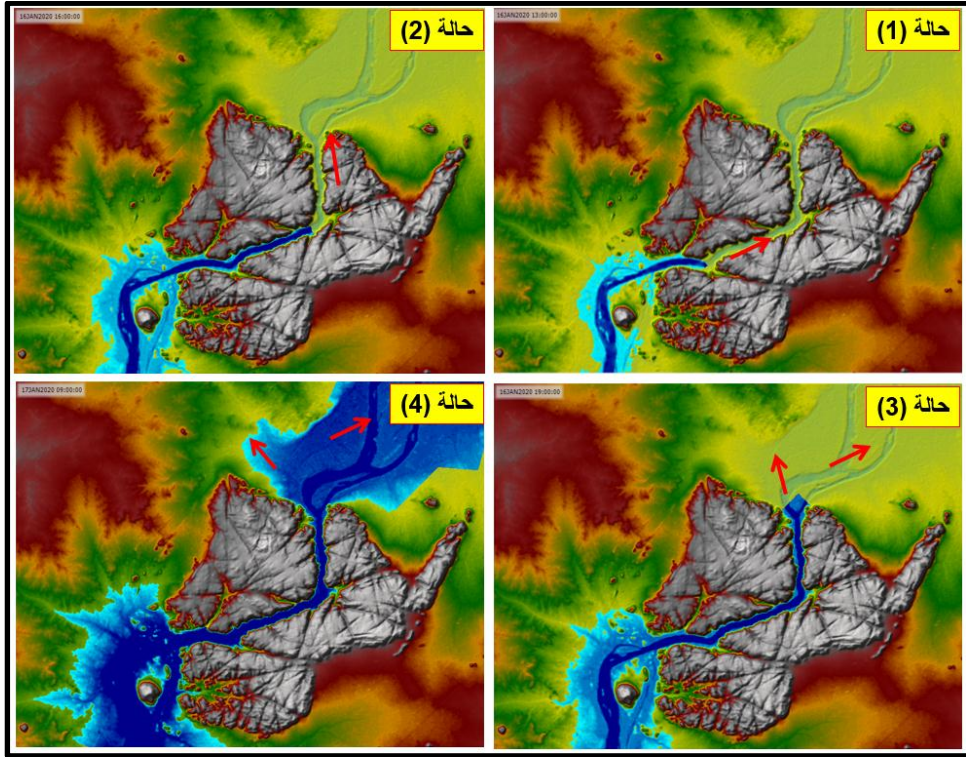
- أن منطقة خانق سبلوكة ضيقة في اتساعها وتجري بها المياه بسرعة شديدة، ويبلغ معدل الانحدار بها ٠.٠٠٠٧ متر/متر، قياساً من التحليل عمليات التحليل الهيدرولوجي ببرنامج (WMS).

- ان قاع المجرى في خانق سبلوكة يتميز بالتضرس نظرا للتكوينات الصخرية شديدة الصلابة، ويبلغ متوسط اتساع المجرى في خانق سبلوكة حوالي ٤٥٠ متراً ومتوسط العمق حوالي ١١ متراً كما سبق الذكر.
 - تنحصر سرعة المياه في خانق سبلوكة بين ٠.١ إلى ١.٧ متر/ث قياساً من نموذج (HEC-RAS). تضعف سرعة المياه في المجرى النهري عند مدخل الخانق، وتزداد السرعة عند مخرجه.
- ويوضح شكل (٢٣) نموذجاً للمحاكاة الهيدروليكية لحركة المياه وتدفقها في خانق سبلوكة بكميات كبيرة في حالة انهيار سد النهضة الإثيوبي، حيث أنه سوف تندفع المياه بقوة فتصطدم بجانب الخانق فتعمل على حدوث حركة دوران للخلف في الأجزاء الجانبية للمجرى، وهذا قد يؤدي إلى ارتفاع منسوب المياه أمام الخانق تدريجياً وتكوين بحيرة النيل الأبيض (بحيرة السد).



المصدر: عمل الباحثان اعتماداً على نموذج (HEC-RAS) ونتائج النمذجة الهيدرولوجية HEC-1

شكل (٢٢) نمذجة المحاكاة الهيدروليكية لعمق المياه وسرعتها في منطقة خانق سبلوكة في الوضع الطبيعي



المصدر: عمل الباحثان إعتاماداً على نموذج (HEC-RAS) ونتائج النمذجة الهيدرولوجية HEC-1

شكل (٢٣) نمذجة المحاكاة الهيدروليكية للمياه في منطقة خانق سبلوكة وتكوين

البحيرة المائية في حالة انهيار سد النهضة

(أ) الوضع الهيدرولوجي للنيل الأبيض وهيئته الخليجية الجديدة:

سوف تتكون بحيرة بين منسوب ٣٤٨ إلى ٤٠٠ متر فوق سطح البحر (أي بعمق ٥٢ م) بمساحة ٢٦٨٢٣ كم^٢؛ يمكنها استيعاب ٩٠ مليار م^٣ من المياه (أي كمية المياه المتدفقة من سد النهضة في حالة انهياره) غير أن المياه سوف ترتفع باتجاه الجنوب نتيجة لوجود خانق سبلوكة وضيق مجراه الصخري واستواء سطح الأرض نسبياً من الخرطوم حتى ملتقى نهر السوبات بالنيل الأبيض بالقرب من مدينة ملكال في دولة جنوب السودان.

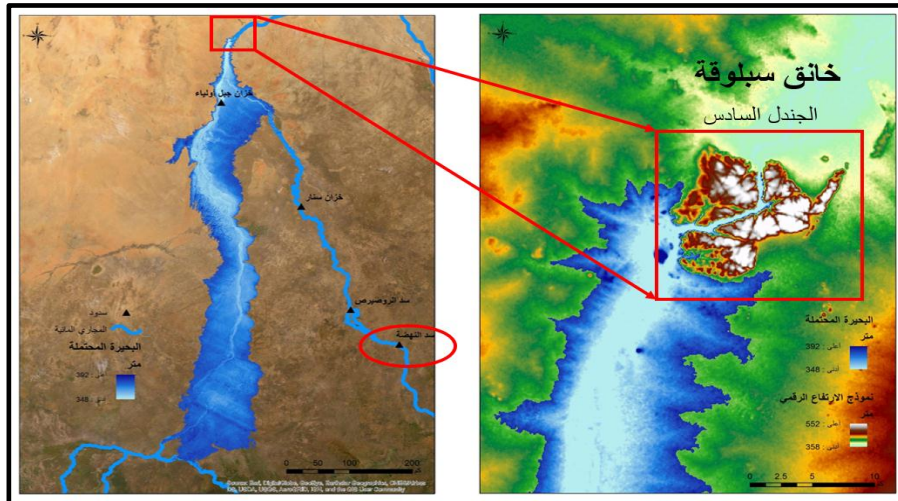
يتبين من تحليل خريطة بحيرة النيل الأبيض (بحيرة السد) التي قد تغمرها المياه في حالة انهيار سد النهضة ظهور النيل الأبيض في هيئة خليجية نتيجة غمر المياه لأفمام الأودية الجافة بين خانق سبوقة ومدينة ملكال في جنوب السودان، وتكوين ملامح خلجان نهريّة، بالإضافة إلي غرق خزان جبل الأولياء ووقوعه تحت منسوب سطح المياه.

جدول (١١) السعة التخزينية أمام الجندل السادس وصولاً لمدينة ملكال جنوباً

ارتفاع سطح الأرض بالمتر عن مستوى البحر	كمية المياه المحتمل تخزينها حسب الارتفاع (مليار م ^٣)
٣٩٢	١٣٧,٩
٣٩٠	٨٩,٨
٣٨٠	١,٥
٣٧٠	٠,٠٣٨
٣٦٠	٠,٠٠٢١

المصدر: عمل الباحثان اعتماداً على تحليل نموذج الارتفاعات الرقمية AW3D 30m، وبرنامج

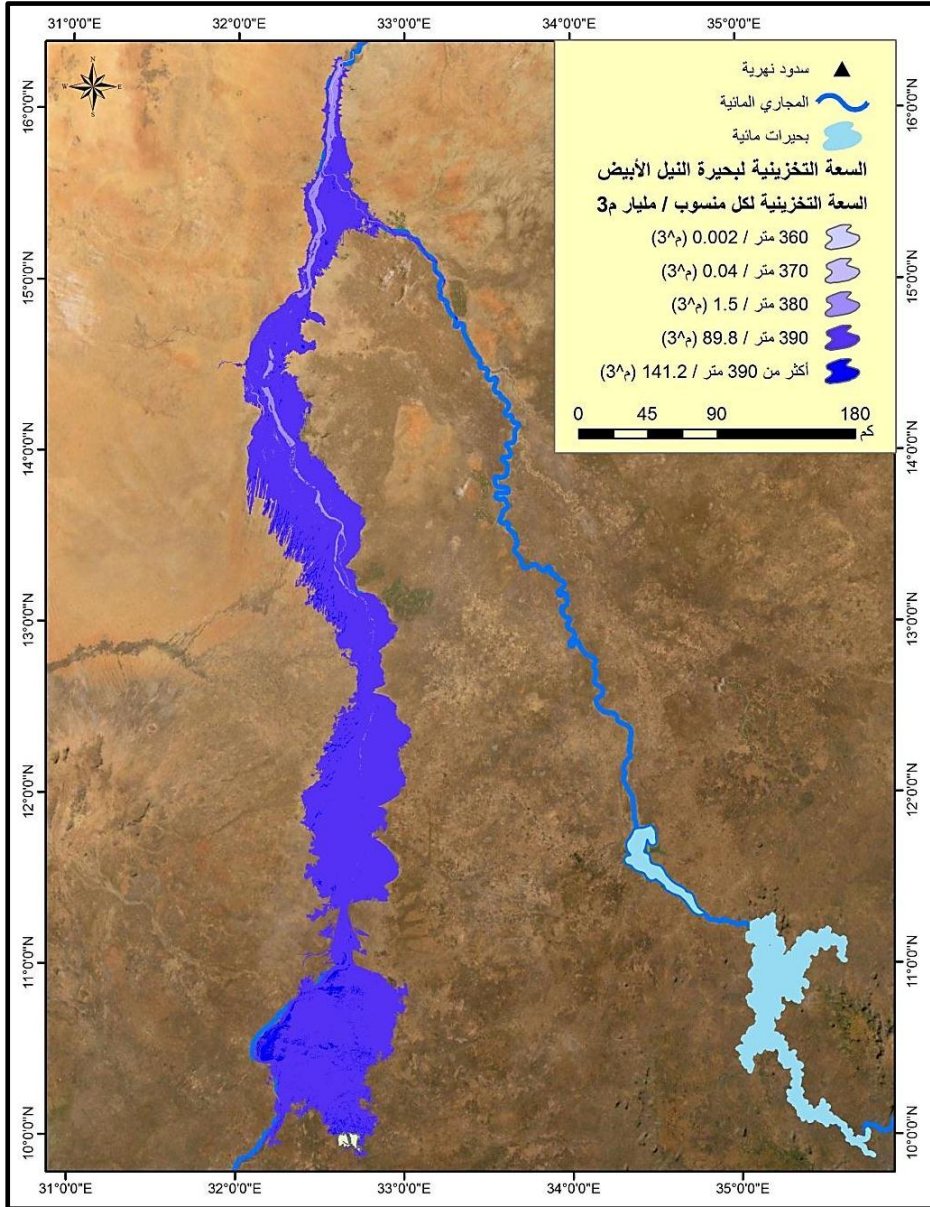
ArcGIS



المصدر: عمل الباحثان اعتماداً على تحليل نموذج الارتفاعات الرقمية AW3D 30m، وبرنامج

ArcGIS

شكل (٢٤) طبوغرافية منطقة خانق سبوقة ووادي النيل الأبيض في الهيئة الخليجية.



المصدر: عمل الباحثان إعتتماداً على تحليل نموذج الارتفاعات الرقمية AW3D 30m،

وبرنامج ArcGIS

شكل (٢٥) الهيئة الخليجية للنيل الأبيض مكوناً (بحيرة السد الحديثة) التي قد

تظهر في حالة حدوث انهيار سد النهضة

٥- طرق مواجهة المشكلة في مصر:

يمكن مواجهة مشكلة حدوث انهيار في سد النهضة الأثيوبي في مصر من خلال موقعين أساسيين هما:

(أ) بحيرات توشكى:

ينقسم منخفض توشكى إلى أربعة منخفضات صغرى متجاورة تتصل فيما بينها من خلال مسارات (وصلات) ضحلة تساعد على نقل المياه من المفيض الجنوبي عند الامتلاء الي الشمالي مباشرة. ويبلغ مجموع سعتها التخزينية عند منسوب ١٧٠ متراً فوق سطح البحر حوالي ١٠٤ مليار م^٣. وقد تم ربط هذه البحيرات مع بحيرة ناصر من خلال قناة تعرف باسم (ترعة مفيض توشكى) والتي يبلغ طولها ٢٢ كم ومتوسط عرضها ٥٠٠ م، ويصل معدل إمكانية تصرف ترعة مفيض توشكى حوالي ٣٠٠ مليون م^٣/يوم.

وتستخدم بحيرات منخفض توشكى في تمرير المياه الزائدة عن السعة التخزينية لبحيرة السد العالي في حالة الفيضان العالي الي البحيرات لحماية جسم السد؛ وقد دخلت المياه هذه البحيرات في ١٥ نوفمبر عام ١٩٩٦ نتيجة لحدوث فيضان عالي أدى إلى ارتفاع منسوب المياه أمام السد العالي بمقدار ١٧٨.٥٥ متراً^(٦).

تتمثل أهمية منخفضات توشكى في كونها المصدر الآمن لتصريف المياه الزائدة عن حاجة السد العالي، وهي تقع على منسوب ١٣٠ متراً فوق سطح البحر ويبلغ اتساع البحيرات والمناطق المنخفضة حولها عند خط كنتور ١٧٠م

(٦) <https://www.mwri.gov.eg/index.php/ministry-2/ministry-19>

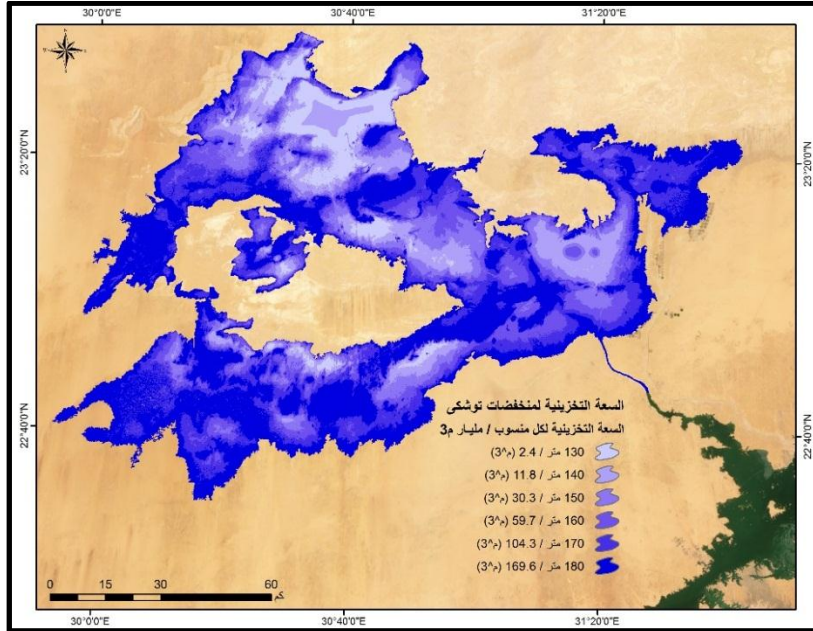
حوالي ٥٤٤٩,٧ كم^٢، وتبلغ السعة التخزينية للمنخفضات عند منسوب ١٧٠ م حوالي ١٠٤,٣ مليار م^٣ وهي تساوي كمية المياه التي يمكن أن تتدفق في حالة انهيار سد النهضة والسدود التي تقع أمامه ووصول المياه للأراضي المصرية جنوباً، ويوضح جدول (١٢) العلاقة بين مناسيب سطح الأرض في منخفضات توشكى وكمية المياه التي يمكن تخزينها عند كل منسوب بالمتري مكعب، حيث يمكن تخزين ٣,٣ مليار م^٣ عند منسوب ١٥٠ م في منخفضات توشكى.

جدول (١٢) السعة التخزينية لمنخفضات توشكى.

الارتفاع بالمتري	المساحة البحرية عند كل منسوب (كم ^٢)	كمية المياه التي يمكن تخزينها حسب المنسوب (مليار م ^٣)
١٨٠	٧٦٥٧	١٦٩.٦
١٧٠	٥٤٤٩,٧	١٠٤.٣
١٦٠	٣٦٢٠	٥٩.٧
١٥٠	٢٣٥١	٣٠.٣
١٤٠	١٤٠٢	١١.٨
١٣٠	٥٠٣,٥	٢٤

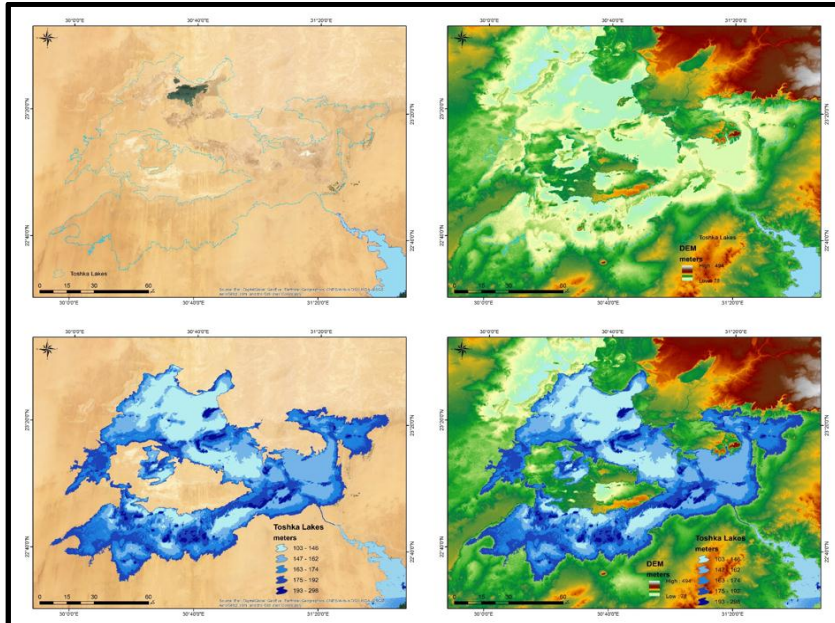
المصدر: عمل الباحثان اعتماداً على تحليل نموذج الارتفاعات الرقمية AW3D 30m، وبرنامج ArcGIS

ولما كان منخفض توشكى يتكون من مجموعة من المنخفضات الثانوية الكبيرة منها والصغيرة وأبرزها أربعة منخفضات كما يوضحها شكل (٢٦) فإنه يبدأ تدفق المياه أولاً في البحيرة الأولى والتي تعد حلقة الوصل بين ترعة مفيض توشكى التي تأخذ من مياه بحيرة السد العالي والبحيرات الثلاثة الأخرى التي تقع في شمالها وغربها؛ حيث يبدأ تدفق المياه من البحيرة الأولى نحو البحيرات الثلاث الأخرى عند وصول المياه فيها إلي منسوب ١٥٦ م فوق سطح البحر.



المصدر: عمل الباحثان اعتماداً على تحليل نموذج AW3D 30m، وبرنامج ArcGIS

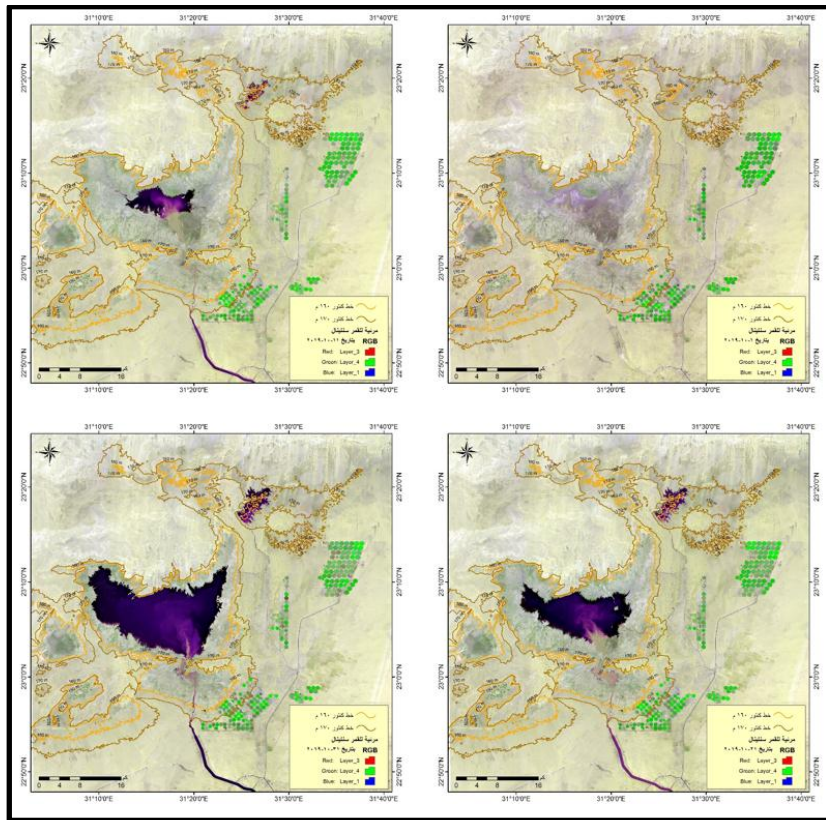
شكل (٢٦) السعة التخزينية لبحيرات توشكى الأربعة عند المناسيب المختلفة



المصدر: عمل الباحثان اعتماداً على تحليل نموذج AW3D 30m، وبرنامج ArcGIS

شكل (٢٧) طبوغرافية منطقة منخفضات توشكى ومساحات التخزين المائي.

ساعد ربط منخفض توشكى ببخيرة ناصر في الحفاظ على أمان السد العالي من ارتفاع مستوى المياه أمامه؛ وعدم زيادة منسوب المياه في مجري النيل شمال السد العالي حتى لا تغرق الجزر النيلية والضفاف المنخفضة. ويمكن تحويل المياه من بحيرة ناصر جنوباً إلي مفيض توشكى غربي بحيرة ناصر حتى يمتلئ إلي منسوب ١٧٨ م، وتم فتح مفيض توشكى عام ٢٠١٩ كما سبق الذكر عندما وصل منسوب المياه أمام السد العالي إلي ١٨١.٥ م فوق البحر، واستمر تدفق المياه نتيجة طول فترة فيضان عام ٢٠١٩، شكل (٢٨).



المصدر: عمل الباحثان إعتماًداً على مرئيات القمر الصناعي (Sentinel)

شكل (٢٨) نموذج محاكاة واقعي من صور القمر الصناعي (Sentinel)

لمراحل امتلاء البحيرة الأولى في منخفض توشكى الأولى أثناء الفيضان عام ٢٠١٩

تتسرب المياه المخزنة في منخفضات توشكى إلى الخزان الجوفي (الحجر الرملي النوبي) في الصحراء الغربية؛ ويتبخر جزء آخر من مياهها نتيجة لعدم استمرار تدفق المياه لها إلا في حالة وجود كميات زائدة من المياه في بحيرة ناصر، ويبلغ عرض ترعة مفيض توشكى عند المأخذ حوالي ٧٥٠ م وعرضها عند المصب في البحيرة الأولى التي يمكن أن تتكون حوالي ٢٥٠ م، ويبلغ أقصى تصريف للقناة ٣٠٠ مليون م^٣ في يوم، علما بأنه تم فتح مفيض توشكى بتاريخ ٨ أكتوبر عام ٢٠١٩.

(ب) السد العالي ومفيضاته:

السد العالي هو عبارة عن سد مائي ركامي أنشئ على مجرى النيل جنوب أسوان للتحكم في مياه الفيضانات وتخزين المياه وتوليد الكهرباء، ويبلغ ارتفاعه ١١١ م، ويبلغ أقصى كمية تصريف للسد العالي حوالي ١١٠٠٠ مليون م^٣/ث (أي حوالي ٩٥٠ مليون م^٣ / يوم).

يستخدم مفيض الطوارئ الغربي في حالة زيادة الفيضان عن مستوي أكثر من ١٧٨ متراً حسب تقديرات الفيضان المتوقعة، حيث يتم تمرير المياه من خلال قناة تحويل قصيرة تصب في النيل مباشرة ولا تستخدم في توليد الكهرباء؛ وتبلغ كمية التصريف لمفيض طوارئ السد العالي حوالي ٣٣٠ مليون م^٣ من المياه يومياً، ومنها يتم تصريف المياه عند زيادة منسوب الفيضان.

سادساً: النتائج والتوصيات :

- أ- النتائج: من خلال التكامل بين أنظمة المعلومات الجغرافية وبرمجيات النماذج الهيدرولوجية في برنامج (WMS)، تم عمل محاكاة لعمليات تدفق المياه وأحواضها الفرعية، حيث أظهرت النتائج الآتية: -
- تراوح عمق الأمطار المتوقع بين ١٠٠٥٠ و١٠٠٢٠م (١٠٢، ١١٧م) على التوالي.
 - يمكن أن تؤدي الفيضانات العالية إلى تغير الخصائص المورفومترية للأحواض الثانوية.
 - أظهرت تحليلات الحساسية لكل من النماذج الهيدرولوجية والهيدروليكية أن حوض النيل الأزرق سوف ينقسم إلى جزئين عند تشغيل سد النهضة وهما الحوض الأعلى و الأدنى للنيل الأزرق ، وسوف يتحكم الحوض الأعلى في ٣٤ مليار م^٣ من المياه، يتدفق منها حوالي ٢٠ مليار م^٣ من المياه السطحية من الحوض الأدنى بعيدا عن سد النهضة .
 - تم إنتاج خريطة توقعية باستخدام النمذجة الهيدروليكية للتعرف على المواقع المعرضة لأخطار الفيضان في حالة انهيار سد النهضة حيث اتضح أنه سوف تتكون بحيرة عملاقة جنوب خانق سبلوكة (وهي منطقة الجندل السادس) وتمتد جنوباً على طول امتداد النيل الأبيض وهو نطاق بحيرة قديمة
 - ظهور وتكوين جزر نهريّة صخرية جديدة لم تكن موجودة نتيجة للتخزين أمام سد النهضة وهي في الأصل عبارة عن تلال ومرتفعات أحاطتها المياه بعد تكوين البحيرة تشغيل السد.
 - تكوين بحيرة طولية في هيئة خليجية نتيجة لغمر المياه لجوانب المجرى.
 - اختفاء الكثير من الجزر النهريّة المنخفضة المنسوب في موضع بحيرة سد النهضة نتيجة لغمرها بالمياه.

- في حالة حدوث انهيار لسد النهضة فإنه سوف يحدث غمر لقرى ومدن السهل الفيضي للنيل الأبيض والتي بلغ عددها ٣٥٨ مدينة وقرية على امتداد جانبي النيل الأبيض بمساحة ١٤١٥ كم^٢.
 - قد يتسبب حدوث انهيار لسد النهضة لأضرار جسيمة للمدن والقرى السودانية القريبة من ضفاف المجرى، كذلك يمكن أن تتعرض بحيرة السد العالي بين مصر والسودان لارتفاع منسوب المياه فيها إذا لم يتم أخذ التدابير اللازمة لتصريف المياه من البحيرة قبل وصول مياه فيضان سد النهضة.
 - هناك فرصة لمواجهة المياه الناتجة عن انهيار السد إذا وصلت إلى مصر عن طريق توجيهها إلى منخفض توشكى.
- ب- التوصيات:**

- تخزين تدفق المياه القادمة من هضبة البحيرات الاستوائية في دول المنبع بعمل سدود بالاتفاق بين مصر ودول المنبع للاستفادة من المياه في موسم جفاف النيل الأزرق.
- إنشاء سدود حماية داخل بحيرة ناصر (سدود ركامية أو حواجز صخرية) لتقليل سرعة المياه في حالة انهيار سد النهضة في منتصف البحيرة شمال ترعة مفيض توشكى وهي منطقة ضيقة عرض البحيرة فيها ١٣٠٠ متراً جنوب وادي العلاقي.
- توسعة وتعميق ترعة مفيض توشكى وذلك لتسهيل تحويل ودخول المياه لبحيرات منخفض توشكى بسهولة وسرعة.
- الإسراع في عملية ترميم وتأهيل ترعة مفيض توشكى ليكون في حالة استعداد لتخزين كميات المياه الزائدة عن المعدل المعتاد لبحيرة السد العالي؛ للاستفادة منها في الحقن الجوفي لخزانات المياه الجوفية.
- ضرورة تطهير مفيض السد العالي الاحتياطي وتجربة فتحه كل فترة زمنية لضمان استمرار تدفق المياه بسهولة.

- ضرورة عمل السلامة الأمنية للمنشآت الأخرى مثل القناطر والخزانات على النيل.
- تطبيق نظام المعلومات الجغرافية في رصد الأضرار البيئية التي قد تتجم من تدفق المياه في مجرى النيل بكميات ضخمة وضرورة إيجاد حل لها.
- وضع الارشادات في مناطق مفيض توشكى لتدريب الأهالي على عمليات الاستعداد في حالة فتح المفيض بعد زراعة ضفاف بحيرات المفيض.
- ضرورة تقنين عملية الري واستخدام الآلات الري بالتنقيط والتكنولوجيا الحديثة.
- تقسيم ضفاف البحيرة إلى مناسيب حسب ارتفاع المياه الدائم والموسمي ومناسيب أعلى فيضان قد يحدث خلال فترة ومنية.
- يُقترح زيادة الدراسات التي تختص بدراسة المياه في أعالي النيل ووضع حلول للعقبات التي من شأنها أن تضر بتدفق مياه لفيضانات في مجاري الأنهار وروافد نهر النيل.
- يتم اقتراح شبكة أرصاد جوية في أعالي النيل تتبع مصر بالتعاون مع دول المنبع لقياس كمية تساقط الأمطار اليومية بدقة عالية بالإضافة إلى وضع أجهزة إنذار للفيضانات.

قائمة المراجع:

-المراجع العربية.

- ١- التركماني، جودة فتحي(١٩٩١):التغيرات الجيومورفولوجية لوادي النيل النوبي بين الجندلين الثالث والرابع، نشرة البحوث الجغرافية، العدد ١٤ .
- ٢- -----(١٩٩٧): جيومورفولوجية مجرى النيل وتغيراته المعاصرة في منطقة ثنية قنا، المجلة الجغرافية العربية، العدد ٣٠، ج ٢.
- ٣- -----(٢٠١١): أشكال السطح دراسة في أصول الجيومورفولوجيا ، دار الثقافة العربية، القاهرة.
- ٤- ----- (٢٠١٩): أصول البحث الجغرافي:النظرية والتطبيق، دار الثقافة العربية، القاهرة.
- ٥- الجرمه، سهير كليب (٢٠١٧) تقييم الأثر البيئي لانهيارات السدود "نموذج محاكاة على السد العالي، جامعة الفيوم، كلية الآداب، -قسم الجغرافيا، رسالة ماجستير غير منشورة.
- ٦- شرف، محمد ابراهيم ،عبد الكريم،أشرف (٢٠١٩):النمذجة الهيدرولوجية والهيدرولوجية للسيول باستخدام برنامج نظام نمذجة الأحواض المائية WMS "أسس ومفاهيم وتطبيقات عربية"،مكتبة العبيكان.
- ٧- خوجلي، مصطفى (٢٠١٠):استراتيجيات و جهود معالجة تأثير فيضانات نهر القاش على مدينة كسلا، مجلة الدراسات السودانية، جامعة الخرطوم - معهد الدراسات الافريقية والاسيوية،المجلد ١٦ .
- ٨- سعيد، رشدي (١٩٩٣) نهر النيل نشأته واستخدام مياهه في الماضي والمستقبل، دار الهلال، الطبعة الأولى، القاهرة.
- ٩- شرقي، عباس محمد (٢٠١٠)الموارد المائية في السودان في حالة الانفصال، معهد البحوث والدراسات الأفريقية، جامعة القاهرة ،أعمال مؤتمر "العلاقات المصرية السودانية في ضوء الظروف الراهنة في السودان ١٢ - ١٣ ديسمبر ٢٠١٠ .

- ١٠- شراقي، عباس محمد(٢٠١٤) الموارد المائية في أفريقيا والعالم العربي،
المجلة المصرية لدراسات حوض النيل- جامعة القاهرة، المجلد الثاني- العدد
الأول ص ص ١ - ٣٣.
- ١١- ----- (٢٠١٤) جيولوجية سد النهضة وأثرها على أمان السد -
مؤتمر قضايا مياه النيل ، كلية الآداب ، جامعة القاهرة.
- ١٢- عبد الحميد، أحمد كمال(٢٠١٩): التحليل الهيدرولوجي لأحواض التصريف
المؤثرة على بحيرة سد النهضة باستخدام تقنيات نظم المعلومات الجغرافية
والنمذجة الهيدرولوجية، المجلة العربية للدراسات الجغرافية، المجلد ٢، العدد
٣.

- المراجع الأجنبية.

- 1- **Abdel Hamid, H, et.al.,(2020):** Environmental sensitivity to the risk of flash floods using geospatial techniques, Global J. Environ. Sci. Manage. 6(1): 31-46.
- 2- **Abdelhaleem,S.,(2011):** Assessing The Risk Of The Aswan High Dam Breaching, Engineering Research Journal, Faculty of Engineering, Minoufiya University.
- 3- **Abdelhaleem,S.,(2011):**Inundation Hazards And Flood Waves propagation due to Dams Failure, doctorate of philosophy in civil Engineering ,faculty of Engineering,Shebin, Elkom
- 4- **Abdelazim M. N., (2017) :**The Nile River, Springer.
- 5- **Alemu,W&Belachew,D.,(2008):** Flood Hazard and Risk Assessment in Fogera A Woreda Using GIS & Remote Sensing,Northeast Ethiopia, Conference: Workshop on Hydrology and Ecology of the Nile River Basin under Extreme Conditions, At Addis Ababa, Ethiopia.
- 6- **Assefa M. M., (2014):** Nile River Basin Hydrology, Climate and Water Use, Springer, USA.
- 7- **Al-Taiee, T. M., & Rasheed, A. M. (2009):** Simulation Tigris River Flood Wave in Mosul City Due to a

- Hypothetical Mosul Dam Break1. International Water Technology Conference, IWTC 13, Hurghada, Egypt.
- 8- **Abteu, W., and Dessu, S. B., (2019):** The Grand Ethiopian Renaissance Dam on the Blue Nile, Springer
 - 9- **Abteu, W , et.al., (2009) :**Spatial, inter and intra-annual variability of the Upper Blue Nile Basin rainfall." Hydrological processes 23: 3075-3082.
 - 10- **Ayele,F,et.al,(2018):** Evaluation of satellite rainfall estimates over the Lake Tana basin at the source region of the Blue Nile River,Atmospheric Research,Volume 212, Pages 43-53.
 - 11- **Ball,J.,(1939):** Contribution to The geography of Egypt ,Ministry of Finance ,Egypt,survey and mins Dept.Cairo
 - 12- **Bashar, E. K., & et. Al., (2015):**Virtual Failure Influence of Roseires Dam of Khartoum City using HEC-RAS Hydraulic Simulation Modeling", Sust Journal of Engineering and Computer Science (JECS), Vol. 16, N03.
 - 13- **Conway, D., (2000):**The Climate and Hydrology of the Upper Blue Nile River." The Geographical Journal 166.
 - 14- **Dow, D., et.al., (1971) :**Palaeozoic glacial rocks recently discovered in Northern Ethiopia." Geol Mag. 108: 53-60.
 - 15- **Dottori, F & Etal,(2016):** Development and evaluation of a framework for global flood hazard mapping, Advances in Water Resources,Volume 94, Pages 87-102.
 - 16- **Eldho, T.,(2009):**Integrated watershed modeling and characterization using fem, Gis & remote sensing techniques ISH Journal of Hydraulic Engineering Volume 15, Pages 227-243
 - 17- **El Bastawesy, M,et.al., (2008):**The use of remote sensing and GIS for the estimation of water loss from Tushka lakes, southwestern desert, Egypt." J. Afr. Earth Sci. 52(3).
 - 18- **Elmahdy, S, Marghany M, and Mohamed M., (2016):** Application of a weighted spatial probability model in GIS

- to analyse landslides in Penang Island, Malaysia. *Geomat Nat Haz Risk*. 7: 345-359.
- 19- **El-Nashar, W&Etal,(2018)**: Managing risks of the Grand Ethiopian Renaissance Dam on Egypt, *Ain Shams Engineering Journal Open Access* Volume 9, Issue 4, December 2018, Pages 2383-2388.
 - 20- **Eshra, N.,(2010)**:GIS Database for River Nile, Fourteenth International Water Technology Conference, IWTC 14 ,PP549-562, Cairo, Egypt 14, IWT4, ,Cairo, Egypt
 - 21- **Helwa,A,et.al., (2020)**: Dam break analysis of Old Aswan Dam on Nile River using HEC-RAS, *Int. J. Hydrology Science and Technology*, Vol. 10, No. 6.
 - 22- **Herbert, S., (2014)**. :Assessing seismic risk in Ethiopia. ." GSDRC Helpdesk Research Report 1087. Birmingham, UK: GSDRC, University of Birmingham.
 - 23- **IPoE (2013)** :International Panel of experts (IPoE) on Grand Ethiopian Renaissance Dam Project (GERDP)." Final Report, Addis Ababa, Ethiopia, May, 31st; 2013. Available: <http://www.internationalrivers.org>.
 - 24- **Johnston, R& McCartney, M., (2010)**:Inventory of water storage types in the Blue Nile and Volta river basins." *IWMI* 140.
 - 25- **Kansara,p,et.al.,(2021)**: An Assessment of the Filling Process of the Grand Ethiopian Renaissance Dam and Its Impact on the Downstream Countries, *Remote Sensing*, Volume 13, Issue 4, Pages 1 – 17.
 - 26- **Kazmin, V., (1972)**:Geological map of Ethiopia, 1:2,000,000 scale." Addis Ababa: Hunting Surveys.
 - 27- **Kinde, S., (2002)** :Earthquake Risks in Addis Ababa and other Major Ethiopian Cities - Will the Country be Caught Off-guarded? ." *MediaETHIOPIA*.
 - 28- **kowalczuk,et.al.,(2018)**: River Flow Simulation Based on the HEC-RAS System, International Conference on Diagnostics of Processes and Systems, Gdansk U ,Poland.

- 29- **Mohamed, M. & Elmahdy S., (2017):**Remote sensing of the Grand Ethiopian Renaissance Dam: a hazard and environmental impacts assessment." *Geomatics, Natural Hazards and Risk* 8(2): 1225-1240.
- 30- **Robi, M, et-al.,(2019):** Flood hazard mapping under a climate change scenario in a Ribb catchment of Blue Nile River basin, Ethiopia , *Applied Geomatics*,Volume 11, Issue 2, P.P 147-160.
- 31- **Omran, E. and Negm A., (2019):** Environmental Impacts of the GERD Project on Egypt's Aswan High Dam Lake and Mitigation and Adaptation Options. *Grand Ethiopian Renaissance Dam Versus Aswan High Dam: A View from Egypt.* A. M. Negm and S. Abdel-Fattah. Cham, Springer International Publishing: 175-196.
- 32- **Saber,M,et.al.,(2010):**Flash flooding simulation using Hydrological Modeling of Wadi Basins at River Nile Based on Satellite Remote Sensing Data, *Annuals of Disas.prev,res,Inst,Kyoto University*
- 33- **Sepehri, M,etal.,(2019):** Assessment of check dams' role in flood hazard mapping in a semi-arid environment, *geomatics, Natural Hazards and Risk*Open AccessVolume 10, Issue 1, Pages 2239-2256.
- 34- **Taye, M. & Willems,P.,(2011) :**Influence of climate variability on representative QDF predictions of the upper Blue Nile basin." *Journal of Hydrology and Hydromechanics* 411: 355-365.
- 35- **Teferi, E., et. al (2010) :**The use of remote sensing to quantify wetland loss in the Choke Mountain range, Upper Blue Nile basin, Ethiopia." *Hydrology and Earth System Sciences* 14(12).
- 36- **Tarekegn, T, et.al.,(2010):** Assessment of an ASTER-generated DEM for 2D hydrodynamic flood modeling, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*,Volume 12, Issue 6, P. 457-465

- 37- **Tekleab, S., et. al (2011)** :Water balance modeling of Upper Blue Nile catchments using a top-down approach." Hydrology and Earth System Sciences 15(7).
- 38- **Uhlenbrook, S., et.al (2010)** :Analyzing catchment behavior through catchment modeling in the Gilgel Abay, upper Blue Nile River basin, Ethiopia." Hydrology and Earth System Sciences 14: 2153-2165.
- 39- **Wondim,Y.,(2016)** :Hazard and Risk Assessment Using GIS and Remote Sensing in Lower Awash Sub-basin, Ethiopia, journal of Environment and Earth Science.vol 6,n9.
- 40- **Youssef M. H., (2017):**The Grand Ethiopian Renaissance Dam, its Impact on Egyptian Agriculture and the Potential for Alleviating Water Scarcity, Springer.

-المواقع الإلكترونية.

- 1- [USGS, 2020: https://landsat.usgs.gov](https://landsat.usgs.gov)
- 2- http://www.eumetrain.org/data/3/36/print.htm#page_3.2.1
- 3- [NASA, 2020: www.nasa.org.com](http://www.nasa.org.com)
- 4- [Maxar 2021: http://www.digitalglobe.com/](http://www.digitalglobe.com/)
- 5- www.windfinder.com
- 6- [Tutiempo, 2019: http://en.tutiempo.net/](http://en.tutiempo.net/)
- 7- [USGS, 2021: http://earthexplorer.usgs.gov/](http://earthexplorer.usgs.gov/)
- 8- <https://climatecharts.net/>
- 9- https://geographic.org/global_weather/
- 10- <https://onlinelibrary.wiley.com/journal/10969837>
- 11- <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/gpcc-global-precipitation-climatology-centre>
- 12- <https://08105ftfi-1105-y-https-www-scopus-com.mplbci.ekb.eg/>
- 13- <https://www.springer.com/gp>
- 14- <https://www.tandfonline.com/action/doSearch?AllField=hazard>