

CONTENTS

	Page
Table of contents	i
List of Tables	v
List of Figures	vi
Acknowledgement	ix
ملخص البحث	x
Abstract	xiv
Chapter one: Introduction	
1.2 Location and accessibility	1
1.3 Objectives of the research	3
1.4. Climate and vegetation	3
1.5. Topography and drainage	8
1.6 Problem statement	11
1.7. Previous work	11
1.8. Methodology	12
Chapter two: General geology and structures	
2.1. Introduction	14
2.2. Superficial deposits: (Quaternary to Recent	17
2.3 El Labda Laterite deposits	17
2.4 Nubian Formation	18
2.4.1 Psephitic facies	19
2.4.2 Psammitic facies	19
2.4.3 Pelitic facies	20
2.5 Basement Complex rocks	21
2.5.1 Structures	22
2.5.2 Structural setting	22

2.5.3	Structures of the Basement Complex	22
2.5.4	Post- Basement structures	23
2.6	Stratigraphy and history of Ennahud region	23

Chapter three: Geophysical survey

3.1	Gravity survey	25
3.1.1	Introduction	25
3.1.2	Interpretation of gravity measurements	28
3.1.2.1	Qualitative interpretation	28
3.1.2.2	Regional and residual determination	32
3.1.3	Quantitative interpretation	36
3.1.4	Gravity findings and results	41
3.2	Geo-electrical survey	41
3.2.1	General	41
3.2.2	Objectives of vertical electrical sounding (VES)	42
3.2.3	Theoretical background	42
3.2.4	Interpretation of resistivity data	44
3.2.4.1	Qualitative interpretation	44
3.2.4.2	Quantitative interpretation	46
3.2.5	Interpretation results	50
3.2.5.1	Geo-electrical sections	50
3.2.5.2	Formation resistivities and formation factor	60
3.2.5.3	Stratigraphy of the Nubian Sandstone Aquifer	62

Chapter four: Hydrogeology of the study area

4.1.	Introduction	64
4.2.	Classification of aquifers	64
4.2.1.	The Nubian Sandstone aquifer	64

4.2.2	The Superficial deposits aquifer	65
4.2.3	The Basement Complex	65
4.3	Aquifer system of Ennahud basin	66
4.4	The hydrologic conditions.	71
4.4.1.	Groundwater levels.	71
4.4.2.	Source of recharge.	78
4.4.3.	Abstraction rates.	79
4.5.	Aquifer hydraulic properties.	82
4.5.1	Transmissibility and hydraulic conductivity	82
4.6	Groundwater storage	87
4,7	Groundwater in/outflow	87

Chapter five: Groundwater quality

5.1	Introduction	90
5.2.	Physiochemical characteristics	90
5.3.	Distribution of hydro-chemical facies	93
5.3.1.	Total dissolved solid.	93
5.3.2.	Chloride concentration distribution.	94
5.3.3.	Sodium concentration distribution.	95
5.3.4.	Bicarbonates concentration distribution.	96
5.3.5.	Sulfates concentration distribution	97
5.4	Groundwater types and suitability	98

Chapter six: Groundwater modeling

6.1	Introduction	100
6.2	Visual modflow and governing equation	103
6.2.1	Visual modflow	103
6.2.2	Visual modflow equation	105
6.2.3	Conceptual model	107

6.3	Model input data	109
6.3.1	Aquifers	109
6.3.2	Observation wells	109
6.3.3	Discharge	111
6.3.4	Recharge	111
6.3.5	Hydraulic conductivity	113
6.3.6	Initial conditions	114
6.3.7	Boundary conditions	115
6.4	Model calibration and results	116
6.4.1	Transient model calibration	117
6.4.1.1	Manual trail –and- error adjustment of parameters	117
6.4.1.2	Calibration Statistics	119
6.5	Model Results	121
6.5.1	Groundwater flow pattern	125
6.5.2	Zone budgets	126
6.6	Model prediction results	128

Chapter Seven: Conclusion and recommendation

7.1	Conclusion	131
7.2	Recommendations	136
	References	138
	Appendix	145

List of Tables

1.1	Rainfall and evaporation	4
2.1	Geologic sequence in the study area	15
3.1	Rocks densities at different areas in Sudan	29
3.2	General geo-electrical sequence of the sub-surface layers	50
3.3	Lithological succession section	54
3.4	Lithological succession section 4-4	56
3.5	Formation resistivity and formation factor	61
4.1	Wells tapping superficial deposits	65
4.2	Abstraction from wells in Ennahud	80
4.3	Well yield and well specific capacity	81
4.4	Transmissibility values and storage coefficient.	85
5.1	Chemical composition of water in Ennahud basin	92
6.1	Cumulative budget for the area	128
6.2	Predicted cumulative budget for the whole area zone	129
6.3	Predicted drawdown of years, 2010 and 2015	129

List of Figures

1.1	Location map of the study area	2
1.2	Monthly mean temperatures at Ennahud station	5
1.3	Annual average rainfall at Ennahud station (1960 – 2005)	6
1.4	Average rainfall at stations in western part of Northern Kordofan	6
1.5	Isohyetal map of rainfall in the study area	7
1.6	Average monthly rainfall and evaporation at Ennahud station	8
1.7	Drainage system of Ennahud basin – Radar image map	10
2.1	Tectonics Rift Basins map	14
2.2	Geologic map of the study area	16
2.3	Schematic geological section across Ennahud basin	24
3.1	Geophysical measurements location map	27
3.2	Bouguer anomaly map- Ennahud basin	31
3.3	Graphical separation of residual gravity from regional trend	33
3.4	Residual gravity map	35
3.5	Graphical presentation of depth calculation	36
3.6	Gravity profile III	38
3.7	Gravity profile XXIII	39
3.8	Gravity profile XXV	40
3.9	Schematic Schlumberger configuration	43
3.10	Types of vertical electrical sounding curves	45
3.11	QH type curve	47
3.12	HK type curve shallow B.C.	48
3.13	QHK type curve at a site where no B.C	49
3.14	Geo electrical section 1-1	51
3.15	Geo electrical section 2-2	53
3.16	Geo electrical section 3-3	55
3.17	Geo electrical section 4-4	57
3.18	Depth to Basement map – Ennahud basin	59

4.1	Hydrogeological section A - A"	67
4.2	Hydrogeological section B - B	67
4.3	Hydrogeological section C-C	68
4.4	Hydrogeological section D-D	68
4.5	Hydrogeological profiles map	69
4.6	Hydrogeological map of the study area	70
4.7	Observation wells –water level monitoring profiles	72
4.8	Groundwater level variation & fluctuation -profile A-A	72
4.9	Groundwater level variation & fluctuation - profile B-B	73
4.10	Groundwater level fluctuation along profile C-C	73
4.11	Water level contours and flow direction map –June 2007	76
4.12	Water level contour and flow direction map –Oct. 2007	77
4.13	Transmissibility distribution map	86
4.14	Influence of geological structure on groundwater flow	89
5.1	TDS areal distribution map	94
5.2	Chloride distribution map	95
5.3	Distribution map of Sodium concentration	96
5.4	Bicarbonates concentration map	97
5.5	Distribution Sulfates concentration of map	98
5.6	Piper diagram	99
6.1	Steps of developing conceptual model	102
6.2	Observation wells location map	110
6.3	Pumping wells location map	112
6.4	Hydraulic conductivity zonation map	113
6.5	Initial head distribution map	114
6.6	Schematic diagram of the model domain Boundary	115
6.7	Boundary conditions of the model domain	116
6.8a	Observed versus calculated head at stress period (181d)	119
6.8b	Water level contour lines first year (2005)	122

6.9a	Observed versus calculated head at stress period (2006d)	123
6.9 b	Water level contour lines second year (2006)	123
6.10a	Observed versus calculated head at stress period (3466d)	124
6.10b	Water level contour lines third year (2007)	124
6.11	Flow direction in the model domain	126
6.12a	Predicted water level contour for year 2010	130
6.12b	Predicted water level contour for year 2015	130

Acknowledgements

I wish to express my sincere appreciation to Dr. Abdalla G. Farwa, who supervised this work very closely and patiently. In particular I wish to express my gratitude to Dr. Adil Balla for his efforts on the part of groundwater modeling, with high spirit of assistance.

I wish to acknowledge the co-orporation and support of Mr. Khalid Marouf, the General Manager of The Kordofan Development Corporation. Special thanks are due to all who contributed in this work in any way or another.

Finally, I would like to take this opportunity to express my sincere gratitude to my family, and in particular, to my sincere wife who patiently and strongly stood by my side during this work.

بسم الله الرحمن الرحيم

ملخص البحث

تهدف الدراسة الحالية لمعرفة البنية الجيولوجية والخصائص الهيدروجيولوجية والهيدرولوجية لخزان النهود الجوفي وذلك لتحديث المعلومات السابقة وتحديد المناطق الجيدة من حيث خواصها الهيدرولوجية لإستغلالها في مشاريع التنمية الزراعية مستقبلاً .

في هذه الدراسة تم إستخدام الطرق البحثية التقليدية المعروفة -الجيولوجية، الجيوفيزيائية، الهيدروجيولوجية والهيدركيميائية - لتحديد الأبعاد الهندسية، الخصائص الهيدرولوجية للخزان ونوعية المياه كماأستخدمت طريقة المحاكاه وأنموذج المياه الجوفية (Groundwater modeling and simulation) بتطبيق برنامج (Visual MODFLOW 3.1) وذلك لعمل موازنة مائية للخزان الجوفي و التنبؤ عن حالة الخزان الجوفي في حوض النهود بعد عشرة سنين .

تتكون البنية الجيولوجية لمنطقة الدراسة من أربع وحدات جيولوجية هي:

- الصخور الأساسية: وتتكون من الصخور النارية والمتحولة
- صخور الحجر النوبي: وتتكون من الحجر الرملي والحصوي والطيني خليط منها جميعاً .
- رسوبيات اللابدة: وتتكون من الطين والطين الرملي وأكاسيد الحديد
- الرسوبيات الحديثة: وهي تغطي سطح الارض وتتكون من الرمل والحصي والرمل الطيني .

من الناحية التكوينية التكتونية والتركيبية فإن حوض النهود الجوفي يعتبر من سلسلة الأحواض الجوفية التي تكونت بفعل الحركات التكتونية الأفريقية (Tectonic African Rift) في العصر الكريتاسي (Cretaceous). وهو عبارة عن حوض محدد بواسطة عدة إنكسارات هي التي تحكمت في بلورة شكله الحالي والذي يمثل جزيرة من الرسوبيات وسط الجسم القاري الهائل من الصخور الأساسية .

تم تطبيق طريقتين من الطرق الجيوفيزيائية، طريقة الجاذبية (Gravity method) والطريقة الجيوكهربائية (Geo-electrical method). شملت الدراسة بطريقة الجاذبية قراءة ١٤٩٠ نقطة جاذبية موزعة علي ٢٤ مسار. بينما بلغ عدد نقاط الدراسة بالطريقة الجيوكهربائية ٧٤ سبر عمودي كهربائي (Vertical Electrical Sounding (VES)).

أدت نتائج المساحة الجيوفيزيائية إلي تحديد الأبعاد الهندسية للحوض فأتضح أنه يتكون من حفرة عظيمة شكلها غير منتظم تمتد من الشرق إلي الغرب بطول ١٧٠ كلم وعرض ٢٠ كلم تقريباً. ويبلغ أقصى عمق فيها حوالي ١٢٠٠ متر بينما تتراوح الأعماق فيما بقي من الحوض ما بين ١٢٥ مترو ٤٠٠ متر. تنقسم الوحدات الهيدروجيولوجية إلي ثلاث وحدات من حيث الخصائص الهيدرولوجية هي:-

- غير مسامية (impervious) - الصخور الأساسية الصماء

- شبه مسامية (semi pervious) - الحجر الطيني والطيني الرملي

- مسامي (pervious) الحجر الرملي والحجر الرملي الحصى.

توجد المياه الجوفية في حوض النهود الجوفي في طبقات الحجر الرملي و الحجر الرملي الحصى في حالة خزان غير مغطي (unconfined aquifer condition) مع وجود بعض التباين الطفيف في الخصائص الهيدرولوجية علي المستويين الأفقي والرأسي. يتراوح متوسط سمك الخزان ما بين ٣٠ متر و ٣٠٠ متر.

توجد في حوض النهود الجوفي عدد ١٦٠ بئر منها ١١٠ بئر منتجة وتتراوح أعماقها ما بين ١٠٨ متر و ٤٢٠ متر. كما تتباين الأعماق لمنسوب المياه الجوفية الثابت من ٥٠ متر إلي ١٥٠ متر. أما إنتاجيات الآبار فتختلف من منطقة لأخري داخل الحوض، إذ تبلغ في بعض المناطق ٤٤ متر مكعب/اليوم بينما تصل إلي ١٨٠٠ متر مكعب/اليوم في مناطق أخري من الخزان.

تمت قياسات دورية لمناسيب المياه الجوفية في عدد من الآبار بغرض مراقبة حركة المياه وإتضح من ذلك أن منسوب المياه يتذبذب مقدار يتراوح ما بين ٤ متر و ٦ أمتار في وسط الحوض بينما في أطراف الحوض لا يزيد مقدار التذبذب عن واحد متر فقط.

تعتبر مياه الأمطار في فصل الخريف المصدر الرئيس للتغذية في حوض النهود. تقدر التغذية السنوية من مياه الأمطار بحوالي 149 مليون متر مكعب. كما تدخل الحوض كميات أخرى من المياه الجوفية عن طريق الشقوق والإنكسارات في الصخور الأساسية حول الحوض. أما فاقد المياه من الحوض بواسطة الضخ من الآبار فمقداره ٦.٣ مليون متر مكعب سنوياً. كما يوجد فاقد كبير من المياه عن طريق سريان المياه الجوفية خارج الحوض.

أجريت إختبارات ضخ وإنتاجية لعدد ٣٥ بئر في خزان النهود الجوفي وتم حساب الخواص الهيدرولوجية للخزان وهي:

$$\text{- الإدرارية (T) } = (190 - 830\text{m}^2/\text{d})$$

$$\text{- النفاذية (K) } = (8 - 34\text{m}/\text{d})$$

$$\text{- معامل التخزين (S) } = (5 \times 10^{-5} - 9 \times 10^{-2})$$

أما نوعية المياه الجوفية في حوض النهود فإنها جيدة تتراوح ملوحتها من ٨٥ ملقرام/لتر إلي ٥٠٠ ملقرام في اللتر علي وجه العموم، ما عدا منطقة أبودقل والتي توجد بها ملوحة عالية وصلت ٢٣٦٦ ملقرام في اللتر الواحد. إرتبطت المناطق ذات الملوحة بالتكوينات الطينية المختلفة والصخور الأساسية المتآكلة.

بتطبيق أنموذج المحاكاة علي الخزان بإستخدام برنامج (Visual MODFLOW 3.1) تم عمل موازنة مائية حيث أن متوسط جملة التغذية السنوية للخزان بلغ ٥٣٠ مليون متر مكعب.

وفي حالة التنبؤ لعام ٢٠١٥ عندما يصل معدل الضخ السنوي ٤٥ مليون متر مكعب فإن ذلك سوف يؤدي إلى هبوط في منسوب المياه في الحوض مقداره ٥ متر فقط.

يتضح جيداً من هذه الدراسة أن حوض النهود الجوفي يمكن أن يكون مصدراً مستداماً بتوفير ٥٠ مليون متر مكعب في العام لري مشاريع زراعية في المنطقة وخاصة المنطقة الوسطى الممتدة من جنوبي الخوي شمالاً حتى أبو قلب جنوباً .

Abstract

The work mainly aims to characterize the hydrogeology of Ennahud basin and delineate favorable sites for groundwater development. Conventional quantitative hydrogeological methods have been used to provide local estimates of hydraulic properties and average the overall hydrogeologic conditions. Then a conceptual model is used with the aid of visual modflow software to evaluate groundwater budget, calculating inflow, outflow and fluctuation in hydraulic head.

The main geologic units are; Basement Complex, Nubian Sandstone, (Cretaceous), Labda Laterite deposits and Quaternary Superficial deposits. The Cretaceous Sandstone is a single group composed of intercalations of sandstone, siltstone, mudstone and conglomerates.

The geophysical survey provided results pertaining to basin geometry, geological structure and stratigraphic sequences of the subsurface. The results delineated a large faulted basin structure (graben) of 150km long and 100km wide. The deepest part of the graben has a maximum depth of 1200m. The groundwater occurrence and availability is good within the horizon between 125 to 400m.

There are three hydrogeological divisions in the area; impervious Basement rocks, semi pervious unit of sandy mudstone and pervious Sandstone.

Geologically Ennahud is considered as an outlier, structurally controlled basin and it was created during the tectonics processes of African Rift. In the study area, groundwater occurs in the Sandstone aquifer under unconfined condition, with slight variation in hydraulic properties. The saturated thickness varies from 30m to 300m. The depth to water level

varies from 56m to 144m. There is a large fluctuation in the groundwater level between dry and wet season. Infiltration from rainwater constitutes the source of recharge to the sandstone aquifer in the area (149Mm³), while a considerable portion of recharge percolates from the surrounding faulted Basement.

The well yield in Ennahud basin ranges between 6.5m³/h and 120m³/h while the specific capacity varies between 0.36m²/h/m and 60m²/h/m. The total annual abstraction is about 6.2 million cubic meters. The average transmissibility (T), hydraulic conductivity (K) and storage coefficient (S) are 383.4m²/d, 8.2m/d and 4.5x10⁻³ respectively.

The groundwater quality of the Sandstone aquifer is generally good for drinking and household purposes, excluding few areas. The total dissolved solids (TDS) range between 85 ppm and 2366ppm.

The finite difference method is selected for the numerical solution of the partial differential equation as a method for groundwater modeling and the Visual MODFLOW version 3.1 (software) for numerical computation. The maximum computed annual pumpage at year 2015 is 45 million cubic meters while the total annual recharge to the aquifer is computed as 2897 million cubic meters.

The study indicated that all basin area is good for future development, but the most favorable are; the areas which extend from El Khuwei south in the north to Abu Gulb north in the south.