



الحقل المغناطيسي الأرضي المرجعي العالمي في اليمن في بداية عام 2020 والتغيرات طويلة الأمد خلال الفترة من 1900 و2020

إبراهيم عبد الحميد الأكلحي

كلية البترول والموارد الطبيعية ، جامعة صنعاء ، اليمن

الكلمات المفتاحية:

الحقل المغناطيسي الأرضي المرجعي
العناصر المغناطيسية
التغيرات طويلة الأمد
اليمن

الملخص

الحقل المغناطيسي الأرضي المرجعي هو أفضل تمثيل رياضي للحقل المغناطيسي الأرضي المقاس في زمن ما، ويتم تقييمه كل خمس سنوات وأُعدت من قبل الاتحاد الدولي للمغناطيسية الأرضية وعلم الطيران (IAGA) لأهميته في الملاحة، المسح المغناطيسي، رسم الخرائط الجيولوجية، الاستخدامات العسكرية، دراسة الشواذ المغناطيسي المحلي في القشرة الأرضية، عمليات المسح والتوجيه في الأبعاد الثلاثة. تم جمع بيانات قيم عناصر هذا الحقل -مجاناً- من موقع مركز تحليل البيانات للمغناطيسية الأرضية والمغناطيسية الفضائية التابع لجامعة كيوتو اليابانية لـ 171 موقعاً في اليمن لعام 1970 وبداية 2020م والمقارنة بينهما لمعرفة مقدار التغير خلال الخمسين سنة الماضية في قيم العناصر المغناطيسية، كما تم جمع بيانات العناصر المختلفة لهذا الحقل لمراكز مدن عدن، صنعاء وصعدة لبداية كل خمسية للفترة ما بين 1900 وحتى بداية 2020م، مما سمح برسم التغيرات طويلة الأمد لهذا الحقل خلال تلك الفترة.

The International Geomagnetic Reference Field in Yemen at the Beginning of 2020 and The Secular Variations during the Period from 1900 to 2020

Ibrahim A. Al-Akhaly

Faculty of Petroleum and Natural Resources, Sana'a University, Yemen

Keywords:

International Geomagnetic
Reference Field.
Magnetic elements
Secular variation
Yemen

ABSTRACT

The International Geomagnetic Reference Field (IGRF) is the best mathematical fit of the observed geomagnetic field at any specific time. It is adopted by the International Association of Geomagnetism and Aeronomy (IAGA). Due to the importance of this field for navigation, magnetic survey, geological mapping, military usage, local magnetic anomalies in the Earth's crust, surveying, and orientation in three dimensions. The IAGA evaluates and updates this field every five years to account for temporal field variations originating in Earth's core. The elements of the IGRF were determined for 1970 and the beginning of 2020 for the 171 sites in Yemen to compare and determine secular variations during this period. Also, the IGRF elements were determined for the centers of three cities; Aden, Sana'a and Sa'dah at the beginning of every five years from 1900 to the beginning of 2020 to study the secular variation during this period.

المقدمة Introduction

وزاوية الانحراف المغناطيسي (declination, D) هي من تحدد قيمة الحقل المغناطيسي في أي نقطة على سطح الأرض، حيث تختلف قيمة هذا الحقل من نقطة إلى أخرى. كما أن الحقل المغناطيسي الأرضي الكلي لا يكون ثابت الشدة والاتجاه بصورة دائمة، بل يتعرض لتغيرات دورية أو فجائية، وهناك تغيرات تحدث ببطء مُتناهية وتسمى تغيرات طويلة الأمد (secular variations, SV). هناك حركة للأقطاب المغناطيسية وثبات -نوعاً ما- باتجاه الشمال منذ عام 1900م، فالميل بين المحور الجغرافي والمحور المغناطيسي يقل

يُعرف الحقل المغناطيسي الأرضي بأنه كمية متجهة لها مركبتان: المركبة العمودية (vertical component, Z) والمركبة الأفقية (horizontal component, H) وتقاس كل واحدة منهما على حدة، والعلاقة بين هاتين المركبتين يولد الحقل المغناطيسي الأرضي الكلي (total geomagnetic field, F) والمركبة الأفقية يتم تحليلها إلى مركبتين: مركبة باتجاه الشمال (northerly component, X) ومركبة باتجاه الشرق (easterly component, Y). قيمة الحقل المغناطيسي الكلي وزاوية الميل المغناطيسي (inclination, I)

*Corresponding author:

E-mail addresses: Ibnalakhaly@hotmail.com

Article History : Received 17 September 2020 - Received in revised form 19 March 2021 - Accepted 12 May 2021

1)، أي أنه من غير المحتمل أن تعمل التحديثات المستقبلية على تحسين نموذج الحقل المغناطيسي الأرضي المرجعي بشكل هام وكبير. يلخص الجدول 1 تسميات وتاريخ أجيال الحقل المغناطيسي الأرضي المرجعي. حالياً يتكون كل جيل من ثلاثة نماذج؛ نموذج مُصمم للحقل المغناطيسي الأرضي المرجعي النهائي (Definitive Geomagnetic Reference Field, DGRF)، ونموذج للحقل المغناطيسي الأرضي المرجعي (IGRF)، والنموذج الثالث للتغيرات طويلة الأمد (SV) للتنبؤ بالتغير الزمني للمجال المغناطيسي الأرضي على نطاق واسع لمدة 5 سنوات وذلك بعد آخر مراجعة لـ IGRF. تكمن أهمية الحقل المغناطيسي الأرضي المرجعي العالمي (IGRF) بأنه يقدم البديل لعناصر الحقل المغناطيسي الأرضي التي تُقاس في المراصد والمحطات الحقلية المرتبطة بالمراصد عند غياب المراصد المغناطيسية والمحطات الحقلية المرتبطة بها. ويمكن استخدام المركبات المحسوبة من هذا الحقل، مع وجود نسبة مقبولة من الخطأ، بدلاً من تلك المقاسة بالمراصد في الملاحة الجوية والبحرية، التوجه القاري، توجيه القذائف والصواريخ، حساب مسارات الجزيئات المشحونة في الغلاف الجوي المغناطيسي، المسح الجيولوجي والمسح الجيوفيزيائي المغناطيسي [7].

الصيغة الرياضية لنموذج الحقل المغناطيسي الأرضي المرجعي العالمي (IGRF)

الحقل المغناطيسي الأرضي المرجعي العالمي عبارة عن سلسلة من النماذج الرياضية التي تصف الحقل المغناطيسي الأرضي الداخلي في وعلى سطح الأرض والتنبؤ بمعدل تغيره السنوي (والتي تعرف بأنها تغيرات طويلة الأمد) للخمس السنوات التالية لتاريخ إصداره [1,5]. متجه الحقل المغناطيسي الأرضي (\vec{F}) يُعرف ببلغة كمية غير اتجاهية كجهد مغناطيسي (magnetic potential, V). أي أنه الميل السالب للجهد المغناطيسي في إحداثيات قطبية كروية ($\vec{F} = -\nabla V$ where $\nabla^2 V = 0$).

$$V(r, \theta, \phi, t) = a \sum_{n=1}^N \sum_{m=0}^n \left(\frac{a}{r}\right)^{n+1} \times [g_n^m(t) \cos(m\phi) + h_n^m(t) \sin(m\phi) P_n^m(\cos\theta)], \quad (1)$$

حيث a تمثل متوسط نصف قطر الأرض (6371.2 km)، r بعد محطة القياس عن مركز الأرض (geocentric radius) (أي حاصل جمع نصف قطر الأرض الوسطي وارتفاع المحطة عن مستوى سطح البحر)، θ متمم دائرة عرض النقطة التي يُحسب فيها الحقل (co-latitude)، ϕ خط طول النقطة التي يحسب فيها الحقل (longitude)، N أقصى درجة توافقية كروية ويمكن اختيارها في هذه المعادلة هي ($N=14$) لتقليل التشويش الناتج عن حقل القشرة الأرضية (crustal field) [17]، والدالات $P_n^m(\cos\theta)$ تابع ليجاندر (Legendre) المساعد وهو كثير حدود من الدرجة n والترتبة m [18] وهو تابع لـ θ . g_n^m ، h_n^m تمثل معاملات جاوس (Gauss coefficients) وهي المعاملات التوافقية الكروية (spherical harmonic coefficients) وتمثل دالات الزمن (t) وتكون عادةً بوحدة (nT/year) وتُعين تجريبياً كل خمس سنوات [1,7].

قد تختلف الدرجة التوافقية الكروية العظمى لقيمة N من عهد (Epoch) لآخر، حيث كانت ($N=10$) في 1995.0، وتؤخذ المعاملات بدقة 1 (nT)، بينما في 2000.0 تُعطى المعاملات بالدرجة والترتبة 13 وبدقة (0.1 nT)، ومن 2005.0 فصاعداً تُؤخذ المعاملات بدقة (0.01 nT) للحقل المغناطيسي

مع الزمن، حيث كان (9.7°) في عام 2015م ويُقدر حالياً بـ (9.4°) مع بداية العام 2020م. سرعة حركة القطب المغناطيسي الشمالي كانت 5 كم/سنة في عام 1900م، وبلغت ما يقارب 19 كم/سنة عام 1990م ثم زادت بشكل أكبر مع نهاية القرن الماضي حيث وصلت إلى 50 كم/سنة في عام 2000م، وفي الوقت الحالي هناك انخفاض في السرعة حيث انخفضت من 53.2 كم/سنة عام 2015م إلى 42.6 كم/سنة بداية عام 2020م [1].

الحقل المغناطيسي الأرضي المرجعي العالمي (International Geomagnetic Reference Field, IGRF) هو أفضل تمثيل رياضي للحقل المغناطيسي الأرضي المقاس في زمن ما، فهو عبارة عن سلسلة من النماذج الرياضية التي تصف الجزء الداخلي واسع النطاق للحقل المغناطيسي الأرضي خلال الفترة ما بين 1900م وحتى الآن، تم إنشاؤه بواسطة معايير ملائمة ومطابقة لنموذج رياضي للمجال المغناطيسي لقياس بيانات المجال المغناطيسي من المسوحات والمراصد المنتشرة في جميع أنحاء العالم بالإضافة لعمليات الرصد باستخدام الأقمار الصناعية [5-1].

وقد اعتمده الاتحاد الدولي للمغناطيسية الأرضية وعلم الطيران (International Association of Geomagnetism and Aeronomy, IAGA) منذ عام 1965 [6] ويُقيمه ويُحدثه كل خمس سنوات، بسبب التغيرات الزمنية للحقل المغناطيسي والناشئة عن لب الأرض، مما يعكس أدق القياسات المتاحة [5].

يستخدم نموذج الحقل المغناطيسي الأرضي المرجعي العالمي من قبل الجهات الأكاديمية، الحكومية والصناعية في تطبيقات عدة وتشمل انظمة الارجاع المغناطيسي، توجيه الأقمار الصناعية ذات المدار الأرضي المنخفض (Low Earth Orbiting, LEO)، دراسة عمق الأرض الداخلي والقشرة، دراسة الغلاف الجوي المتأين، دراسة الغلاف المغناطيسي والتأثيرات الكهرومغناطيسية، دراسة ديناميكية لب الأرض، دراسة طقس الفضاء، دراسة الشذوذ المغناطيسي المحلي في القشرة الأرضية، الملاحة، المسح الأرضي، المسح المغناطيسي، التوجيه في الأبعاد الثلاثة، رسم الخرائط الجيولوجية والاستخدامات العسكرية، كما يمكن استخدامه من قبل المنظمات التجارية والأفراد كمصدر لمعلومات التوجيه [1,5,7]. ويُصدر الاتحاد الدولي للمغناطيسية الأرضية وعلم الطيران المعاملات الرقمية التي تمثل هذا الحقل. ويضاف إليه قيم التغيرات طويلة الأمد المتوقعة في الحقل المغناطيسي الأرضي في الخمسة أعوام التالية [7].

الحقل المغناطيسي الأرضي المرجعي العالمي هو نتاج عمل تعاوني مشترك بين عدد من الوكالات والمعاهد والجامعات العاملة في المجال المغناطيسي، حيث تقوم بجمع ونشر بيانات المجال المغناطيسي من الأقمار الصناعية والمسوحات المغناطيسية والمراصد المغناطيسية المنتشرة في مناطق كثيرة من العالم والتي تعتبر مراكز بيانات عالمية. ويجب مراجعة نموذج الحقل المغناطيسي الأرضي المرجعي بشكل منتظم من أجل متابعة التغيرات الزمنية والمستمرة للمجال المغناطيسي الأرضي المتولد في النواة الخارجية للأرض [1].

وقد أصدر الاتحاد الدولي للمغناطيسية الأرضية وعلم الطيران الجيل الثالث عشر للحقل المغناطيسي الأرضي المرجعي العالمي (IGRF-13) في 19 ديسمبر 2019م وهو أحدث نسخة من الوصف الرياضي القياسي للمجال المغناطيسي الرئيسي للأرض، وهذا الجيل صالح للفترة الزمنية من 1900.0-2025.0م، أما بالنسبة للفترة الزمنية من 1945.0-2015.0 فهو نهائي (جدول

لعمل خرائط تساوي (كنتورية) رقمية تمثل توزيع قيم العناصر المغناطيسية الأرضية في اليمن.

النتائج والمناقشة Results and discussion

أ. عناصر الحقل المغناطيسي الأرضي المرجع لبداية عام 2020

يرد فيما يأتي ملخص لمركبات الحقل المغناطيسي والواردة في الجدول 2

1- الانحراف المغناطيسي (Declination, D)

تزايد قيم زاوية الانحراف المغناطيسي باتجاه الشمال الغربي إذ تبلغ قيمتها الصغرى (1.010°) في مركز مدينة حصوين (Haswayn, location No. 113) الواقعة على ساحل البحر العربي جنوب غرب مدينة الغيضة بمحافظة المهرة، وقيمتها العظمى (2.624°) في مركز مدينة علب (Alb, location No. 18) الواقعة في أقصى الشمال الغربي لمحافظة صعدة (جدول 2، شكل 2)، بفارق مقداره (1.614°) ومعدل تزايد باتجاه الشمال الغربي مقداره ($0.0017^\circ/\text{km}$). وبلغت قيمها 1.764° ، 2.244° ، 2.501° في مراكز مدن عدن وصنعاء وصعدة على التوالي (جدول 2).

وقد تراوحت قيم زاوية الانحراف المغناطيسي في عام 1970م ما بين (0.175°) في مركز مدينة حصوين و(0.869°) في مركز مدينة علب (جدول 2، شكل 2)، وهذا يتفق مع خرائط تساوي الانحراف المغناطيسي ومعدل تغيره السنوي التي نُشرها (Peddie, 1982) والمرسومة على مسقط وينكل الثلاثي (Winkel Triple projection) [3]. أي أن هناك زيادة ومعدل تغير نسبي مقداره (243 %) خلال الخمسين سنة الماضية.

2- الميل المغناطيسي (Inclination, I)

تزايد قيم الميل المغناطيسي باتجاه الشمال الشرقي، حيث تبلغ قيمتها الصغرى (12.954°) في مركز مدينة رأس العارة (Ras Al Arah, location No. 169) الواقعة على ساحل خليج عدن جنوب غرب محافظة لحج، وقيمتها العظمى (27.907°) في مركز منطقة عرق ابن حمودة (Irq Ibn Hamudah, location No. 1) الواقعة في أقصى الشمال الشرقي لمحافظة المهرة على الحدود اليمنية-العمانية (جدول 2، شكل 2)، بفارق مقداره (14.953°) ومعدل تزايد باتجاه الشمال الشرقي مقداره ($0.0134^\circ/\text{km}$). وبلغت قيمها 13.476° ، 19.275° ، 22.661° في مراكز مدن عدن وصنعاء وصعدة على التوالي (جدول 2).

وقد تراوحت قيم زاوية الانحراف المغناطيسي في عام 1970م ما بين (8.927°) في مركز مدينة حصوين و(24.706°) في مركز مدينة علب (جدول 2، شكل 2)، وهذا يتفق مع خرائط تساوي الميل المغناطيسي ومعدل تغيره السنوي التي نُشرها (Peddie, 1982) [3]. أي أن هناك زيادة ومعدل تغير نسبي مقداره (21 %) خلال الخمسين سنة الماضية.

3- المركبة الشمالية (Northerly component, X)

تناقص قيم شدة المركبة الشمالية باتجاه الشمال الغربي إذ تبلغ قيمتها الصغرى (35962 nT) في مركز مدينة علب (Alb, location No. 18) الواقعة في أقصى الشمال الغربي لمحافظة صعدة، وقيمتها العظمى (36963 nT) في مركز مدينة حصوين (Haswayn, location No. 113) الواقعة على ساحل البحر العربي جنوب غرب مدينة الغيضة بمحافظة المهرة (جدول

الأرضي المرجعي النهائي (DGRF) وبدقة (0.1 nT) لأخر حقل مغناطيسي أرضي مرجعي عالمي (IGRF)، وذلك للاستفادة من التغطية الجيدة والجودة العالية للبيانات التي تقدمها الأقمار الصناعية منخفضة المدار (LEO) [4].

يتم توفير المعاملات $g_n^m(t)$ و $h_n^m(t)$ لمعدل التغيرات السنوية بشكل واضح ومحدد. كما يتم الحصول على مركبات المجال المغناطيسي الأرضي في الاتجاهات الشمالية (X) والشرقية (Y) والعمودية (Z) من معاملات النموذج باستخدام المعادلة (1) وبأخذ ميل الجهد المغناطيسي (V) في الإحداثيات القطبية الكروية

$$X = \frac{1}{r} \frac{\partial V}{\partial \theta}, \quad Y = -\frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial V}{\partial \theta}, \quad Z = \frac{\partial V}{\partial r}. \quad (2)$$

بالنسبة لبعض التطبيقات، لا بد من الحصول على قيم كل من: الانحراف المغناطيسي (D)، الميل المغناطيسي (I)، شدة المركبة الأفقية (H)، وشدة الحقل المغناطيسي الكلي (F)، حيث يتم حسابها من المركبات؛ الشمالية (X)، الشرقية (Y) والعمودية (Z) باستخدام العلاقات الرياضية الآتية:

$$H = \sqrt{X^2 + Y^2}, \quad F = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}, \quad D = \arctan\left(\frac{Y}{X}\right), \quad I = \arctan\left(\frac{Z}{H}\right). \quad (3)$$

في المعادلة (1) يتم استخدام مرجع النظام الجيوديسي العالمي (World Geodetic System 1984, WGS84) والذي يُستخدم في الوقت الحالي لجمع البيانات المغناطيسية بواسطة الأقمار الصناعية، حيث يكون نصف القطر الاستوائي (A=6378.137 km)، ومعامل التفلطح (f=1/298.257223563) وبالتالي فإن نصف القطر القطبي (B=A (1-f)) [1] (=6356.752 km).

المواد وطرق العمل Materials and methods

تم استخدام برنامج (Global Mapper v.13) لفتح نموذج ارتفاع رقمي (Digital Elevation Model, DEM) لليمن بدقة مقدارها 30 م أفقياً و7م عمودياً، للحصول على إحداثيات وارتفاع 171 موقع (شكل 1) والتي تم الحصول على بيانات عناصرها المغناطيسية، تم مطابقة نموذج الارتفاع الرقمي لليمن مع الخرائط الطبوغرافية لمعرفة أسماء المدن والقرى التي تم تحديد إحداثياتها وارتفاعها. بعد ذلك تم ادخال البيانات المطلوبة (خط الطول، دائرة العرض، الارتفاع والعام المراد الحصول على العناصر المغناطيسية له)، ولكل موقع على حدة، للموقع الإلكتروني لمركز تحليل البيانات للمغناطيسية الأرضية والمغناطيسية الفضائية (Data Analysis Center for Geomagnetism and Space Magnetism) التابع لجامعة كيوتو (Kyoto University) في اليابان [19] ليتم الحصول -مجانياً- من على بيانات عناصر الحقل المغناطيسي الأرضي المرجعي (IGRF) لبداية كل خمسية للفترة الزمنية ما بين 1970 و2020 م للمواقع المحددة والوارد توزيعها وأسمائها في (شكل 1، جدول 1). كما تم الحصول على عناصر الحقل المغناطيسي الأرضي المرجعي لبداية كل خمسية للفترة الزمنية ما بين 1900-2020م في مراكز مدن عدن، صنعاء وصعدة. تم استخدام برنامج (Microsoft Excel) في جمع وترتيب وفرز البيانات التي تم الحصول عليها من الموقع الإلكتروني لمركز تحليل البيانات للمغناطيسية الأرضية والمغناطيسية الفضائية في جامعة كيوتو، تلى ذلك استخدام برنامج (Surfer v.13) في عملية الإسقاط الرقمي للمواقع التي تم الحصول على قيم عناصرها المغناطيسية

على ساحل البحر العربي جنوب غرب مدينة الغيضة بمحافظة المهرة (جدول 2، شكل 2)، بفارق مقداره (969 nT) ومعدل تناقص باتجاه الشمال الغربي مقداره (1.03 nT/km). وبلغت قيمها 36602 nT، 36365 nT، 36128 nT في مراكز مدن عدن وصنعاء وصعدة على التوالي (جدول 2). وقد تراوحت قيم المركبة الأفقية في عام 1970م ما بين (36275 nT) في مركز مدينة علب و(37181 nT) في مركز مدينة حصوين (جدول 2، شكل 2)، وهذا يتفق مع خرائط تساوي شدة المركبة الأفقية ومعدل تغيرها السنوي التي نشرها (Peddie, 1982) [3]. أي أن هناك نقص ومعدل تغير نسبي مقداره (-0.70%) خلال الخمسين سنة الماضية.

7- الحقل المغناطيسي الكلي (Total geomagnetic field, F)

تزايد قيم شدة الحقل الكلي باتجاه الشمال الشرقي إذ تبلغ قيمتها الصغرى (37436 nT) في منطقة جبل المهلي (Jabal Al Manhali, location No. 168) الواقعة على باب المندب جنوب غرب محافظة تعز، وقيمها العظمى (40971 nT) في مركز منطقة عرق ابن حمودة (Irq Ibn Hamudah, location No. 1) الواقعة في أقصى الشمال الشرقي لمحافظة المهرة على الحدود اليمنية-العمانية (جدول 2، شكل 2)، بفارق مقداره (3534 nT) ومعدل تزايد باتجاه الشمال الشرقي مقداره (3.086 nT/km). وبلغت قيمها 39150 nT، 38524 nT، 37638 nT في مراكز مدن عدن وصنعاء وصعدة على التوالي (جدول 2).

وقد تراوحت قيم شدة الحقل المغناطيسي الكلي في عام 1970م ما بين (37092 nT) في منطقة جبل المهلي و(40242 nT) في مركز منطقة عرق ابن حمودة (جدول 2، شكل 2)، وهذا يتفق مع خرائط تساوي شدة الحقل الكلي ومعدل تغيره السنوي التي نشرها (Peddie, 1982) [3]. أي أن هناك زيادة ومعدل تغير نسبي مقداره (1.47%) خلال الخمسين سنة الماضية.

ب. منحنيات تغير مركبات الحقل المغناطيسي الأرضي المرجعي

خلال القرن الماضي وبداية القرن الحالي:

تم دراسة التغير في قيم مركبات الحقل المغناطيسي الأرضي المرجعي مع الزمن لبداية كل خمسية للفترة الزمنية من 1900 وحتى بداية 2020م لثلاث مدن يمنية وهي عدن، صنعاء وصعدة (شكل 1) لإظهار هذه التغيرات بتوزع جغرافي يمتد من الجنوب (عدن) إلى الشمال (صعدة) مروراً بالعاصمة صنعاء، حيث لوحظ تشابه كبير بين منحنيات المدن الثلاث مع اختلاف قيم المركبات، زيادة أو نقصاناً.

1- المركبة الشمالية (Northerly component, X): تُشير منحنيات تغير شدة المركبة الشمالية (X) أن هناك تناقصاً في قيمتها منذ بداية القرن الماضي حتى عام 1920 ثم ازدياداً حتى عام 1965، ثم انخفاضاً كبيراً حتى عام 1995، ثم تلى ذلك زيادة تدريجية حتى عام 2020 في مراكز مدن عدن، صنعاء وصعدة (شكل 3).

2- المركبة الشرقية (Easterly component, Y): تُظهر منحنيات تغير شدة المركبة الشرقية (Y) أن بعض القيم سالبة -أي أنها كانت تتجه غربياً- خلال الفترة من 1900 إلى 1915 بالنسبة لمدن عدن، صنعاء وصعدة. وبشكل عام تتناقص القيم السالبة إلى أن تساوي الصفر في العام 1915، ثم تزداد

2، شكل 2)، بفارق مقداره (1001 nT) ومعدل تناقص باتجاه الشمال الغربي مقداره (1.064 nT/km). وبلغت قيمها 36337 nT، 36584 nT، 36094 nT في مراكز مدن عدن وصنعاء وصعدة على التوالي (جدول 2).

وقد تراوحت قيم المركبة الشمالية في عام 1970م ما بين (36271 nT) في مركز مدينة علب و(37181 nT) في مركز مدينة حصوين (جدول 2، شكل 2)، وهذا يتفق مع خرائط تساوي شدة المركبة الشمالية ومعدل تغيرها السنوي التي نشرها (Peddie, 1982) [3]. أي أن هناك نقص ومعدل تغير نسبي مقداره (-0.74%) خلال الخمسين سنة الماضية.

4- المركبة الشرقية (Easterly component, Y)

تزايد قيم شدة المركبة الشرقية باتجاه الشمال الغربي، حيث تبلغ قيمتها الصغرى (652 nT) في مركز مدينة حصوين (Haswayn, location No. 113) الواقعة على ساحل البحر العربي جنوب غرب مدينة الغيضة بمحافظة المهرة، وقيمها العظمى (1648 nT) في مركز مدينة علب (Alb, location No. 18) الواقعة في أقصى الشمال الغربي لمحافظة صعدة (جدول 2، شكل 2)، بفارق مقداره (996 nT) ومعدل تزايد باتجاه الشمال الغربي مقداره (1.058 nT/km). وبلغت قيمها 1127 nT، 1424 nT، 1577 nT في مراكز مدن عدن وصنعاء وصعدة على التوالي (جدول 2).

وقد تراوحت قيم المركبة الشرقية في عام 1970م ما بين (114 nT) في مركز مدينة حصوين و(550 nT) في مركز مدينة علب (جدول 2، شكل 2)، وهذا يتفق مع خرائط تساوي شدة المركبة الشرقية ومعدل تغيرها السنوي التي نشرها (Peddie, 1982) [3]. أي أن هناك زيادة ومعدل تغير نسبي مقداره (240%) خلال الخمسين سنة الماضية.

5- المركبة العمودية (Vertical component, Z)

تزايد قيم شدة المركبة العمودية باتجاه الشمال الشرقي إذ تبلغ قيمتها الصغرى (8400 nT) في مركز مدينة رأس العارة (Ras Al Arah, location No. 169) الواقعة على ساحل خليج عدن جنوب غرب محافظة لحج، وقيمها العظمى (19176 nT) في مركز منطقة عرق ابن حمودة (Irq Ibn Hamudah, location No. 1) الواقعة في أقصى الشمال الشرقي لمحافظة المهرة على الحدود العمانية (جدول 2، شكل 2)، بفارق مقداره (10776 nT) ومعدل تزايد باتجاه الشمال الشرقي مقداره (9.691 nT/km). وبلغت قيمها 12717 nT، 8871 nT، 15084 nT في مراكز مدن عدن وصنعاء وصعدة على التوالي (جدول 2).

وقد تراوحت قيم المركبة العمودية في عام 1970م ما بين (5760 nT) في مركز مدينة رأس العارة و(16819 nT) في مركز منطقة عرق ابن حمودة (جدول 2، شكل 2)، وهذا يتفق مع خرائط تساوي شدة المركبة العمودية ومعدل تغيرها السنوي التي نشرها (Peddie, 1982) [3]. أي أن هناك زيادة ومعدل تغير نسبي مقداره (22%) خلال الخمسين سنة الماضية.

6- المركبة الأفقية (Horizontal component, H)

تتناقص قيم شدة المركبة الشمالية باتجاه الشمال الغربي، حيث تبلغ قيمتها الصغرى (35999 nT) في مركز مدينة علب (Alb, location No. 18) الواقعة في أقصى الشمال الغربي لمحافظة صعدة، وقيمها العظمى (36969 nT) في مركز مدينة حصوين (Haswayn, location No. 113) الواقعة

(D) والميل المغناطيسي (I) في مراكز مدن عدن، صنعاء وصعدة، حيث يلاحظ تزايد في قيمة زاوية الميل المغناطيسي بمركز مدينة عدن من (6.320°) في بداية القرن العشرين إلى (13.353°) في بداية القرن الواحد والعشرين، بينما زادت قيمة زاوية الانحراف المغناطيسي من (-1.855°) في بداية القرن العشرين إلى (1.855°) في بداية القرن الواحد والعشرين. وهناك زيادة في قيمة زاوية الميل المغناطيسي بمركز مدينة صنعاء من (12.235°) في بداية القرن العشرين إلى (19.153°) في بداية القرن الواحد والعشرين، بينما زادت قيمة زاوية الانحراف المغناطيسي من (-1.756°) في بداية القرن العشرين إلى (2.330°) في بداية القرن الواحد والعشرين. كما زادت قيمة زاوية الميل المغناطيسي بمركز مدينة صعدة من (15.720°) في بداية القرن العشرين (1900م) إلى (22.54°) في بداية القرن الواحد والعشرين (بداية عام 2020م)، بينما زادت قيمة زاوية الانحراف المغناطيسي من (-1.682°) في بداية القرن العشرين إلى (2.583°) في بداية القرن الواحد والعشرين.

الاستنتاجات Conclusions

تتلخص أهم الاستنتاجات بما يلي:

- استخدام ما تنشره المراصد المغناطيسية العالمية في الدراسات والتطبيقات المغناطيسية الحالية- سواء كانت جيولوجية، مدنية (الأجهزة التي تحتاج لتحديد شدة الحقل المغناطيسي وميله وانحرافه) أو عسكرية- نظراً لغياب وجود مرصد مغناطيسي في اليمن حتى الآن، لذلك لا بد من استخدام قيم مركبات الحقل المغناطيسي المرجح لتفسير أي مسح مغناطيسي.
- استخدام هذه البيانات في الدراسات والتطبيقات المغناطيسية القديمة وخاصة في تفسير الشواذ المغناطيسية الواردة في الخرائط المغناطيسية التي تم عملها في بلادنا، لأن هذا التفسير لا يكون دقيقاً بدون معرفة شدة الحقل المغناطيسي الكلي وانحرافه وميله في زمن إعداد الخريطة.
- تُشير قيم الحقل المغناطيسي الأرضي الكلي إلى تزايد مستمر وبقيم متفاوتة من بداية القرن الماضي وحتى الآن.
- تؤكد التغيرات المستمرة في مركبات الحقل المغناطيسي الأرضي إلى ضرورة تعديل القيم المستخدمة في الدراسات المختلفة، بحيث تطبق قيم مركبات الحقل في زمن القياس، لأنه من الخطأ اعتماد قيمة ثابتة لمدة طويلة، ولا سيما في الدراسات العلمية الدقيقة وفي التوجيه والامور العسكرية التي تحتاج إلى دقة عالية خاصة في قيمة الانحراف المغناطيسي. حيث يؤدي الخطأ بالتوجيه بمقدار نصف درجة إلى خطأ مقداره 872.7 م على بعد 100 كم.
- تشير التغيرات طويلة الأمد للانحراف المغناطيسي والميل طوال القرن الماضي وبداية القرن الحالي، وهذا موافق لما يحدث في دورة التغيرات الطويلة الأمد والتي أشارت لها التسجيلات العالمية.

المراجع References

- [1]- Thébault, E., Finlay, C. C., Beggan, C. D., Alken, P., Aubert, J., Barrois, O., Bertrand, F., Bondar, T., Boness, A., Brocco, L., Canet, E., Chambodut, A., Chulliat, A., Coisson, P., Civet, F., Du, A., Fournier, A., Fratter, I., Gillet, N., Hamilton, B., Hamoudi, M., Hulot, G., Jager, T., Korte, M., Kuang, W., Lalanne, X., Langlais, B., Lèger, J.-M., Lesur, V., Lowes, F. J.,

بشدة حتى عام 1940 ثم تنخفض بشكل كبير في العام 1945 وتعاود الازدياد في العام 1950 وتعاود الهبوط مرة أخرى عام 1955 ثم تزيد تدريجياً وبشكل طفيف حتى عام 1970، وبعدها تزداد بشدة أكبر حتى عام 1985 وتستمر الزيادة ولكن بشكل طفيف جدا حتى عام 1995 وبعد ذلك تزداد بشكل كبير جدا حتى بداية 2020 في مراكز مدن عدن، صنعاء وصعدة (شكل 4).

3- المركبة العمودية (**Vertical component, Z**): يتضح من منحنيات تغير شدة المركبة العمودية (Z) إلى أن هناك ازدياداً تدريجياً في قيمتها خلال الفترة من 1900 - 2020 (شكل 5).

4- المركبة الأفقية (**Horizontal component, H**): تُشير منحنيات تغير شدة المركبة الأفقية (H) أن هناك تناقصاً تدريجياً طفيفاً خلال الفترة من 1900 وحتى 1920، تلى ذلك ازدياداً ملحوظاً وكبيراً حتى عام 1965، ثم انخفاضاً حتى عام 1995 تلاه زيادة تدريجية طفيفة حتى عام 2020 في مراكز مدن عدن، صنعاء وصعدة (شكل 6).

5- الحقل المغناطيسي الكلي (**Total magnetic field, F**): تُوضح منحنيات تغير شدة الحقل الكلي (F) ازدياداً طفيفاً بين عامي 1900 - 1915 ثم ازدياداً كبيراً بين عامي 1915-1960، ثم تستمر شبة ثابتة حتى عام 1970 ثم تتناقص وبشكل طفيف جدا حتى عام 1990 ثم تعاود الزيادة تدريجياً بين عامي 1995-2020 في مراكز مدن عدن، صنعاء وصعدة (شكل 7).

6- الانحراف المغناطيسي (**Declination, D**): تُظهر منحنيات تغير قيم زاوية الانحراف المغناطيسي (D) ازدياداً كبيراً بين عامي 1900 و 1925 ثم ازدياداً طفيفاً بين عامي 1925 و 1940 ثم انخفاضاً في عام 1945 وزيادة في عام 1950 ثم تتناقص حتى عام 1955 ثم زيادة تدريجية وبشكل طفيف جداً حتى عام 1970، تلى ذلك زيادة كبيرة بين عامي 1970 و 1985، ثم زيادة طفيفة جداً بين عامي 1985 و 1995، ومنذ عام 2000 وحتى بداية 2020 هناك زيادة كبيرة في قيم زاوية الانحراف المغناطيسي في مراكز مدن عدن، صنعاء وصعدة (شكل 8).

7- الميل المغناطيسي (**Inclination, I**): تُشير منحنيات تغير قيم زاوية الميل المغناطيسي (I) إلى حدوث زيادة تدريجية بين عامي 1900 وبداية 2020 في مراكز مدن عدن، صنعاء وصعدة (شكل 9).

8- التغيرات طويلة الأمد (Secular variations):

هي تغيرات في الحقل المغناطيسي الأرضي تحدث تدريجياً وببطء متناهي عبر فترات زمنية طويلة (سنوات، عقود أو قرون)، وتكون ملحوظة ومسجلة في المراصد المغناطيسية المنتشرة في أماكن كثيرة من العالم. يرجع سبب هذه التغيرات إلى العمليات الداخلية المرتبطة ببنو الأرض (core). ومن خلال القياسات المغناطيسية التي أجريت خلال الخمسين سنة الماضية لوحظ وجود تغير تدريجي لمواقع الأقطاب المغناطيسية للأرض نتيجة لهذه العمليات.

يوضح الشكل 10 التغيرات طويلة الأمد للانحراف المغناطيسي

models for 1945, 1950, 1955, and 1960. *J Geomag Geoelect.*, 40: 645–702.

[11]- Langel, R.A. 1992. International Geomagnetic Reference Field: the sixth generation. *J Geomag Geoelect.*, 44: 679–707.

[12]- Barton, C.E. 1997. International Geomagnetic Reference Field: the seventh generation. *J Geomag Geoelect.*, 49: 123–148.

[13]- Manda, M., and Macmillan, S. 2000. International Geomagnetic Reference Field-the eighth generation, 2000. *Earth Planets Space*, 52: 1119–1124.

[14]- Macmillan, S., Maus, S., Bondar, T., Chambodut, A., Golovkov, V., Holme, R., Langlais, B., Lesur V., Lowes, F.J., Luhr, H., Mai W., Manda, M., Olsen, N., Rother, M., Sabaka, T.J., Thomson, A., and Wardinski, I. 2003. The 9th-Generation International Geomagnetic Reference Field. *Geophys J Int.*, 155: 1051–1056.

[15]- Maus, S., Macmillan, S., Chernova, T., Choi, S., Dater, D., Golovkov, V., Lesur, V., Lowes, F.J., Luhr, H., Mai, W., McLean, S., Olsen, N., Rother, M., Sabaka, T.J., Thomson, A., and Zvereva, T. 2005. The 10th-generation International Geomagnetic Reference Field. *Geophys J Int.*, 161: 561–565.

[16]- BGS,2020.http://www.geomag.bgs.ac.uk/data_service/models_compass/igrf_calc.html

[17]- Alken, P., Thèbault, E., Finlay, C. C., Beggan, C. D., Alken, P., Aubert, J., Barrois, O., Bertrand, F., Bondar, T., Boness, A., Brocco, L., Canet, E., Chambodut, A., Chulliat, A., Coisson, P., Civet, F., Du, A., Fournier, A., Fratter, I., Gillet, N., Hamilton, B., Hamoudi, M., Hulot, G., Jager, T., Korte, M., Kuang, W., Lalanne, X., Langlais, B., Lèger, J.-M., Lesur, V., Lowes, F. J., Macmillan, S., Manda, M., Manoj, C., Maus, S., Olsen, N., Petrov, V., Ridley, V., Rother, M., Sabaka, T. J., Saturnino, D., Schachtschneider, R., Sirol, O., Tangborn, A., Thomson, A., Toffner-Clausen, L., Vigneron, P., Wardinski, I., and Zvereva, T., 2020. International Geomagnetic Reference Field: the 13th generation, in press.

[18]- Winch, D.E., Ivers, D.J., Turner, J.P.R., and Stening, R.J. 2005. Geomagnetism and Schmidt quasi-normalization. *Geophysical Journal International*, 160(2): 487-504, URL <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2004.02472.x>.

[19]- <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/igrf/point/index.html>

Macmillan, S., Manda, M., Manoj, C., Maus, S., Olsen, N., Petrov, V., Ridley, V., Rother, M., Sabaka, T. J., Saturnino, D., Schachtschneider, R., Sirol, O., Tangborn, A., Thomson, A., Toffner-Clausen, L., Vigneron, P., Wardinski, I., and Zvereva, T., 2015. International Geomagnetic Reference Field: the 12th generation, *Earth, Planets, and Space*, 67-79.

[2]- Allaby, A. and Allaby, M. 1991. *The Concise Oxford Dictionary of Earth Sciences*. Oxford University Press.

[3]- Peddie, N.W. 1982. International Geomagnetic Reference Field: the third generation. *J Geomag Geoelect* 34: 309–326.

[4]- Finlay, C.C., Maus, S., Beggan, C.D., Bondar, T.N., Chambodut, A., Chernova, T.A., Chulliat, A., Golovkov, V.P., Hamilton, B., Hamoudi, M., Holme, R., Hulot, G., Kuang, W., Langlais, B., Lesur, V., Lowes, F.J., Luhr, H., Macmillan, S., Manda, M., McLean, S., Manoj, C., Menvielle, M., Michaelis, I., Olsen, N., Rauberg, J., Rother, M., Sabaka, T.J., Tangborn, A., Toffner-Clausen, L., and Thebault, E. 2010a) International Geomagnetic Reference Field: the eleventh generation. *Geophys J Int* 183(3): 1216–1230. doi:10.1111/j.1365-246X.2010.04804.x.

[5]- Alken, P., Thèbault, E., Beggan, C. D., Aubert, J., Baerenzung, J., Brown, W. J., Cali, S., Chulliat, A., Cox, G. A., Finlay, C. C., Fournier, A., Gillet, N., Hammer, M. D., Holschneider, M., Hulot, G., Korte, M., Lesur, V., Livermore, P. W., Lowes, F. J., Macmillan, S., Nair, M., Olsen, N., Ropp, G., Rother, M., Schnepf, N. R., Stolle, C., Toh, H., Vervelidou, F., Vigneron P. and Wardinski, I., 2020. Evaluation of candidate models for the 13th generation International Geomagnetic Reference Field. in press.

[6]- Zmuda, A.J. 1971. The International Geomagnetic Reference Field. *Bull Int Assoc Geomag Aeronomy*, 28: 148–152.

[7]- Abou-Deeb, J. M. 2008. The International Geomagnetic Reference Field in Syria at The Beginning of The Year 2008. *Damascus University Journal (Basic Sciences)*, 25(1): 45-72.

[8]- IAGA Division I Study Group Geomagnetic Reference Fields. 1975. International Geomagnetic Reference Field 1975. *J Geomag Geoelect.*, 27: 437–439.

[9]- Barraclough, D.R. 1987. International Geomagnetic Reference Field: the fourth generation. *Phys Earth planet Int* 48: 279–292.

[10]- Langel, R.A., Barraclough, D.R., Kerridge, D.J., Golovkov, V.P., Sabaka, T.J., and Estes, R.H. 1988. Definitive IGRF

Tables

جدول 1: ملخص لتسميات وتاريخ أجيال الحقل المغناطيسي الأرضي المرجعي

Full name	Short name	Main Field	Valid for	Definitive for	Secular Variation	Release Year	Reference
IGRF 13th generation	IGRF-13	1900.0-2020.0	1900.0-2025.0	1945.0-2015.0	2020.0-2025.0	2020	BGS (2020) [16]
IGRF 12th generation	IGRF-12	1900.0-2015.0	1900.0-2020.0	1945.0-2010.0	2015.0-2020.0	2015	Thèbault et al. (2015) [1]
IGRF 11th generation	IGRF-11	1900.0-2010.0	1900.0-2015.0	1945.0-2005.0	2010.0-2015.0	2010	Finlay et al. (2010a) [4]
IGRF 10th generation	IGRF-10	1900.0-2005.0	1900.0-2010.0	1945.0-2000.0	2005.0-2010.0	2005	Maus et al. (2005) [15]
IGRF 9th generation	IGRF-9	1900.0-2000.0	1900.0-2005.0	1945.0-2000.0	2000.0-2005.0	2003	Macmillan et al. (2003) [14]
IGRF 8th generation	IGRF-8	1900.0-2000.0	1900.0-2005.0	1945.0-1990.0	2000.0-2005.0	2000	Manda and Macmillan (2000) [13]
IGRF 7th generation	IGRF-7	1900.0-1995.0	1900.0-2000.0	1945.0-1990.0	1995.0-2000.0	1995	Barton (1997) [12]
IGRF 6th generation	IGRF-6	1945.0-1990.0	1945.0-1995.0	1945.0-1985.0	1990.0-1995.0	1991	Langel (1992) [11]
IGRF 5th generation	IGRF-5	1945.0-1985.0	1945.0-1990.0	1945.0-1980.0	1985.0-1990.0	1987	Langel et al. (1988) [10]
IGRF 4th generation	IGRF-4	1945.0-1985.0	1945.0-1990.0	1965.0-1980.0	1985.0-1990.0	1985	Barraclough (1987) [9]
IGRF 3rd generation	IGRF-3	1965.0-1980.0	1965.0-1985.0	1965.0-1975.0	1980.0-1985.0	1980	Peddie (1982) [3]
IGRF 2nd generation	IGRF-2	1965.0-1975.0	1955.0-1980.0	–	1980.0-1985.0	1975	IAGA (1975) [8]
IGRF 1st generation	IGRF-1	1965.0	1955.0-1975.0	–	1975.0-1980.0	1965	Zmuda (1971) [6]

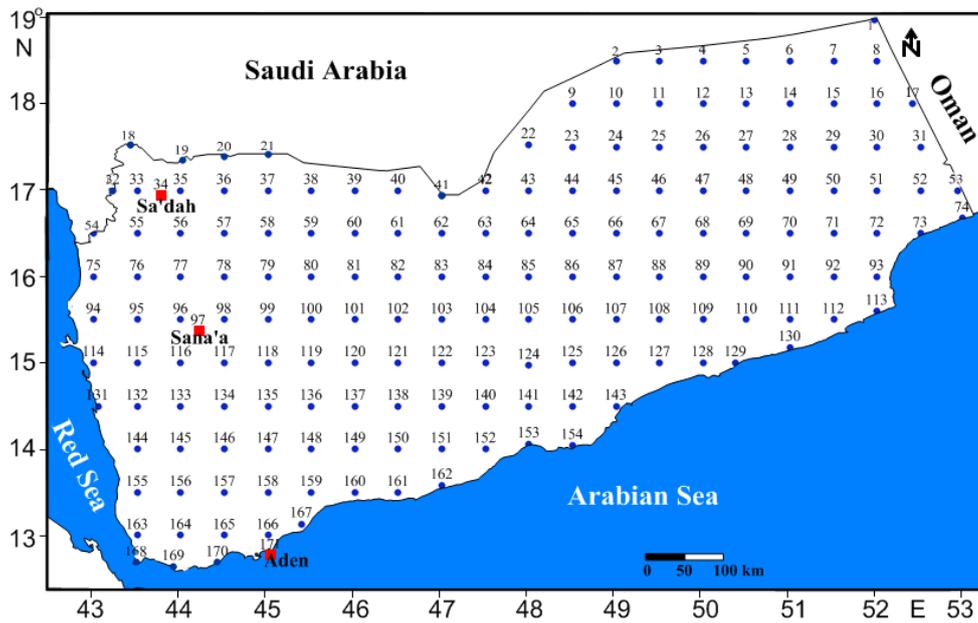
جدول 2: قيم عناصر الحقل المغناطيسي الأرضي المرجعي للمواقع الواردة في شكل 1

ID on Map	Location Name	Declination, D (°)		Inclination, I (°)		Northerly component, X (nT)		Easterly component, Y (nT)		Vertical component, Z (nT)		Horizontal component, H (nT)		Total magnetic field, F (nT)	
		1970	2020	1970	2020	1970	2020	1970	2020	1970	2020	1970	2020	1970	2020
1	Irq Ibn	0.6	1.52	24.	27.	36556	36193	393	966	16819	19176	36558	36206	402	409
2	Al Qaamiyat	0.7	1.95	23.	26.	36459	36067	501	1230	15735	18089	36462	36088	397	403
3	Uruq Al	0.7	1.81	23.	26.	36493	36140	480	1147	15798	18226	36496	36159	397	404
4	Um Al Milh	0.7	1.74	23.	26.	36528	36177	458	1102	15859	18278	36531	36193	398	405
5	Uruq al	0.6	1.67	23.	26.	36563	36213	434	1056	15919	18327	36566	36229	398	406
6	Shuqat Al	0.6	1.59	23.	26.	36599	36251	408	1011	15978	18375	36601	36265	399	406
7	Wadi Namun	0.5	1.52	23.	26.	36635	36288	382	966	16034	18420	36637	36301	399	407
8	Sih Jadilah	0.5	1.45	23.	26.	36673	36328	353	923	16090	18463	36674	36340	400	407
9	Shiqaq Al	0.7	1.96	22.	25.	36531	36157	484	1241	14897	17278	36534	36179	394	400
10	Umm Gharib	0.7	1.88	22.	25.	36565	36192	464	1191	14961	17335	36568	36211	395	401
11	Um Gharib	0.6	1.80	22.	25.	36600	36227	443	1142	15022	17389	36603	36245	395	402
12	Khalif	0.6	1.72	22.	25.	36636	36263	420	1093	15084	17442	36638	36280	396	402
13	Al Farah	0.6	1.64	22.	25.	36670	36299	396	1045	15143	17491	36672	36314	396	403
14	Musayfah	0.5	1.52	22.	25.	36706	36377	369	967.8	15201	17616	36708	36390	397	404
15	Irq Arabah	0.5	1.45	22.	25.	36743	36416	342	923	15258	17662	36745	36428	397	404
16	West Sih	0.4	1.38	22.	25.	36773	36449	313	878	15309	17701	36775	36460	398	405
17	Sih Adwak	0.4	1.36	22.	25.	36809	36443	288	867	15367	17670	36811	36454	398	405
18	Alb	0.8	2.62	20.	23.	36271	35962	550	1648	13460	15931	36275	35999	386	393
19	Wadi Nashur	0.8	2.51	20.	23.	36340	36034	537	1583	13286	15776	36344	36069	386	393
20	Jabal Ath thar	0.8	2.46	20.	23.	36357	36019	538	1551	13414	15814	36361	36052	387	393
21	Uruq As	0.8	2.41	20.	23.	36406	36088	532	1524	13514	16013	36410	36120	388	395
22	Uruq ibn	0.7	1.98	21.	24.	36586	36229	467	1254	14097	16502	36589	36251	392	398
23	Khshm al	0.6	1.83	21.	24.	36626	36306	447	1161	14116	16598	36628	36324	392	399
24	Wadi Hazar	0.6	1.83	21.	24.	36654	36334	427	1163	14177	16650	36656	36352	393	399
25	Wadi	0.6	1.72	21.	24.	36695	36378	405	1092	14242	16707	36698	36394	393	400
26	Thamud	0.5	1.65	21.	24.	36731	36378	381	1052	14302	16680	36733	36393	394	400
27	Rimah	0.5	1.52	21.	24.	36764	36452	356	970.4	14361	16805	36766	36465	394	401
28	Wadi Thuf	0.5	1.45	21.	24.	36800	36490	329	924	14419	16852	36801	36502	395	402
29	Wadi Arabah	0.4	1.37	21.	24.	36838	36532	302	879	14475	16896	36840	36542	395	402
30	W. Shuayt	0.4	1.30	21.	24.	36876	36572	272	833	14530	16939	36877	36581	396	403
31	Wadi Shahan	0.3	1.23	21.	24.	36915	36614	242	789	14583	16980	36916	36623	396	403
32	Al Day'ah	0.8	2.57	18.	22.	36390	36097	509	1626	12442	14934	36394	36133	384	390
33	Al Darbin	0.8	2.54	19.	22.	36348	36050	513	1605	12640	15130	36351	36086	384	391
34	Sa'dah	0.8	2.50	19.	22.	36391	36094	509	1577	12585	15084	36395	36128	385	391
35	Kitaf	0.8	2.48	19.	22.	36356	36068	512	1567	12703	15118	36360	36102	385	391
36	Ruhub	0.8	2.41	19.	22.	36428	36099	509	1524	12787	15199	36431	36132	386	391
37	Al Furaymil	0.7	2.34	19.	22.	36472	36140	504	1477	12861	15282	36475	36171	386	392
38	Shaqqat Al	0.7	2.24	19.	23.	36507	36201	496	1417	12932	15449	36511	36229	387	393
39	Shuqqat al	0.7	2.18	19.	23.	36542	36235	487	1381	13001	15520	36545	36261	387	394
40	Shuqqat	0.7	2.15	19.	23.	36575	36237	475	1365	13069	15500	36578	36263	388	394
41	Al Wadi'ah	0.7	2.05	19.	23.	36622	36286	455	1303	13040	15474	36625	36309	388	394
42	Qurwn Al	0.6	1.99	19.	23.	36640	36301	446	1263	13201	15631	36642	36323	389	395
43	Tahanif	0.6	1.84	19.	23.	36675	36371	429	1170	13268	15774	36678	36390	390	396
44	Wadi	0.6	1.83	19.	23.	36707	36370	410	1165	13331	15750	36709	36388	390	396
45	Al Arri	0.6	1.74	20.	23.	36743	36407	389	1111	13394	15807	36745	36424	391	397
46	Wadi Qinab	0.5	1.66	20.	23.	36778	36444	367	1060	13456	15860	36780	36459	391	397
47	Jabal Al	0.5	1.58	20.	23.	36814	36481	342	1010	13516	15912	36815	36495	392	398
48	Aywah	0.4	1.51	20.	23.	36851	36520	318	967	13576	15962	36853	36533	392	398
49	S. Thuf	0.4	1.42	20.	23.	36888	36559	290	911	13706	16008	36889	36571	393	399
50	Jibal Karoi	0.4	1.35	20.	23.	36925	36599	262	863	13689	16052	36926	36609	393	399
51	Dafhitak	0.3	1.27	20.	23.	36962	36639	232	815	13743	16094	36963	36648	394	400
52	Dakhrab	0.3	1.19	20.	23.	36998	36677	200	768	13794	16132	36999	36685	394	400
53	Qanat	0.2	1.14	20.	23.	37030	36711	178	736	13831	16161	37031	36718	395	401
54	Harad	0.7	2.55	17.	21.	36455	36174	478	1611	11668	14173	36458	36209	382	388
55	Wadi Haydan	0.7	2.49	18.	21.	36457	36171	483	1575	11868	14378	36460	36206	383	389
56	Al Marashi	0.7	2.41	18.	21.	36469	36181	479	1525	11931	14449	36472	36213	383	389
57	Al Humaydat	0.7	2.34	18.	21.	36535	36245	477	1486	12013	14541	36539	36276	384	390
58	Wadi Khab	0.7	2.25	18.	21.	36538	36247	472	1429	12073	14603	36541	36275	384	391
59	Ash Shahla	0.7	2.17	18.	22.	36577	36285	467	1380	12144	14678	36580	36312	385	391
60	Al Qara'in	0.7	2.12	18.	22.	36613	36321	451	1350	12213	14749	36615	36346	385	392
61	East Al Jawfa	0.6	2.05	18.	22.	36645	36354	439	1303	12281	14816	36648	36377	386	392
62	Al Murasas	0.6	1.93	18.	22.	36680	36390	426	1230	12348	14881	36682	36411	387	393
63	Jaww Al	0.6	1.85	18.	22.	36712	36424	409	1180	12413	14942	36714	36443	387	393
64	Al Baridah	0.6	1.83	18.	22.	36745	36426	392	1166	12478	14921	36748	36445	388	393
65	Hawarim	0.5	1.70	18.	22.	36781	36498	373	1085	12543	15059	36783	36514	388	394
66	Huson Al	0.5	1.61	18.	22.	36817	36536	352	1029	12605	15114	36819	36551	389	395
67	Jabal	0.5	1.58	19.	22.	36847	36532	327	1011	12757	15176	36849	36546	389	395
68	Al Wakab	0.4	1.53	19.	22.	36892	36616	305	979	12728	15218	36893	36629	390	396

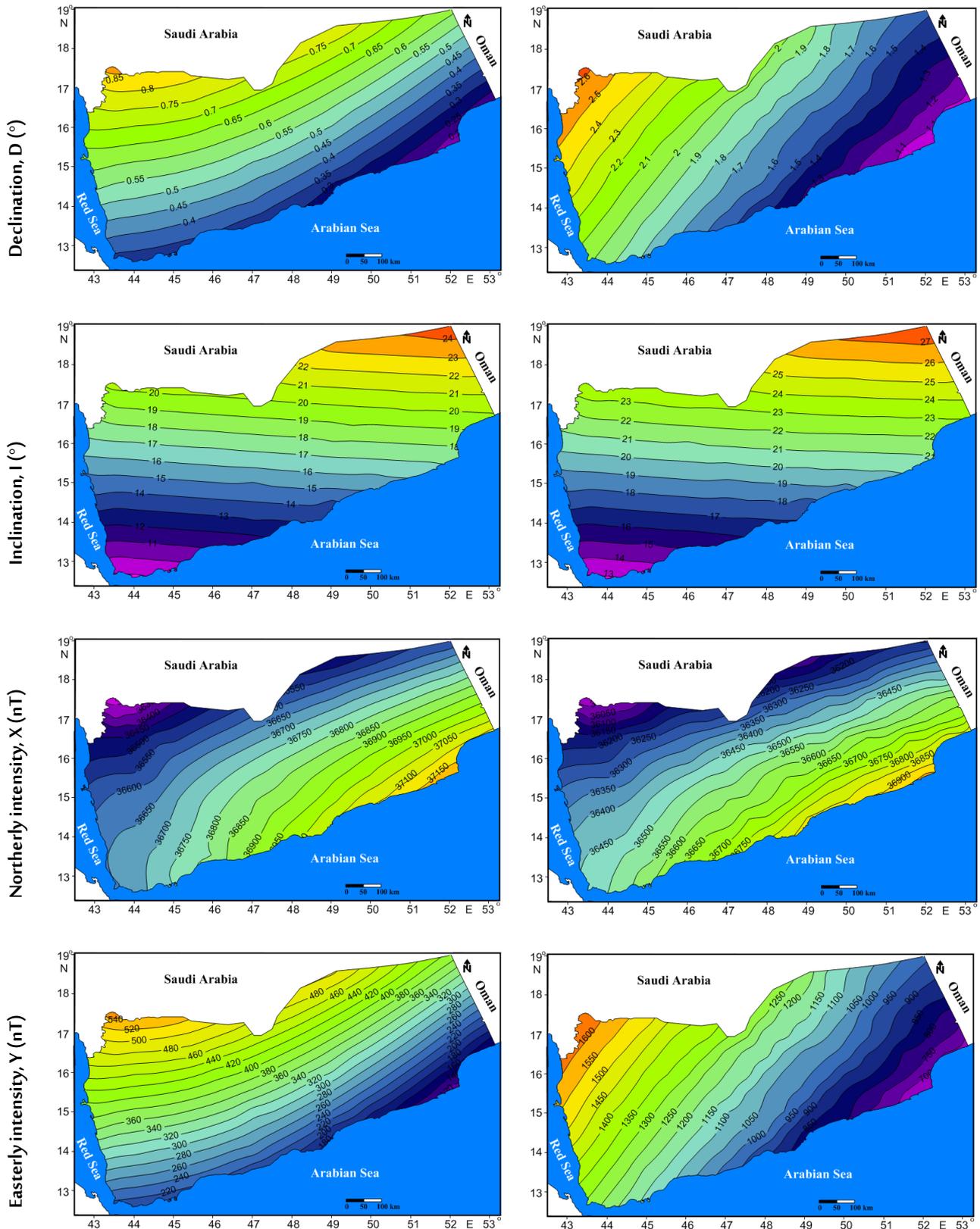
69	Jabal Al Fart	0.4	1.41	19.	22.	36932	36660	278	902	12788	15267	36933	36671	390	397
70	Jabal Sahim	0.3	1.35	19.	22.	36972	36665	252	868	12846	15239	36973	36675	391	397
71	Aqabat	0.3	1.22	19.	22.	37010	36746	222	788	12902	15358	37011	36754	391	398
72	Thabdi	0.2	1.20	19.	22.	37054	36753	191	770	12958	15328	37055	36761	392	398
73	Jabal Rabiah	0.2	1.08	19.	22.	37099	36843	159	697	13012	15445	37099	36849	393	399
74	Hof	0.2	1.08	19.	23.	37109	36805	142	694	13339	15678	37109	36811	394	400
75	Abs	0.7	2.51	16.	20.	36498	36227	450	1589	11011	13527	36501	36261	381	387
76	Al Miftah	0.7	2.43	16.	20.	36504	36230	448	1539	11073	13599	36507	36263	381	387
77	Khamir	0.6	2.35	16.	20.	36515	36241	443	1493	11101	13633	36518	36272	381	387
78	Jabal Silyam	0.6	2.27	17.	20.	36566	36290	441	1442	11208	13755	36569	36319	382	388
79	Ar Raqib	0.6	2.18	17.	20.	36609	36333	435	1386	11285	13833	36611	36359	383	389
80	Hadbat Bin	0.6	2.12	17.	20.	36642	36365	427	1352	11354	13906	36644	36390	383	389
81	Ruwayk	0.6	2.05	17.	20.	36680	36378	413	1307	11387	13854	36682	36402	384	389
82	Ghuwayriban	0.6	1.95	17.	21.	36712	36438	404	1241	11492	14044	36714	36459	384	390
83	Ard Al Garf	0.6	1.88	17.	21.	36746	36473	390	1197	11558	14108	36748	36493	385	391
84	Kahil	0.5	1.83	17.	21.	36782	36511	374	1169	11625	14170	36784	36530	385	391
85	Qarn al Batiri	0.5	1.70	17.	21.	36812	36545	355	1088	11688	14228	36814	36561	386	392
86	Hadabat	0.5	1.62	17.	21.	36846	36582	336	1037	11751	14285	36848	36597	386	392
87	Tarim	0.4	1.58	17.	21.	36884	36587	318	1010	11906	14354	36886	36601	387	393
88	Qa'mah	0.4	1.52	17.	21.	36924	36631	291	976	11877	14319	36926	36644	387	393
89	Al Masilah	0.4	1.40	17.	21.	36965	36676	266	898	11938	14371	36966	36687	388	394
90	Marakhi	0.3	1.36	17.	21.	36998	36711	239	874	11995	14418	36999	36722	388	394
91	Qasaw	0.3	1.28	18.	21.	37037	36753	211	823	12052	14463	37037	36762	389	395
92	Qarrat	0.2	1.20	18.	21.	37074	36794	181	773	12107	14506	37075	36802	390	395
93	W. Harut	0.2	1.12	18.	21.	37128	36851	150	724	12166	14554	37128	36858	390	396
94	Al	0.6	2.45	15.	19.	36548	36289	417	1555	10218	12750	36551	36322	379	384
95	Al Mirawah	0.6	2.37	15.	19.	36563	36303	414	1505	10284	12826	36566	36334	379	385
96	Amd	0.6	2.29	15.	19.	36562	36301	409	1453	10344	12893	36565	36330	380	385
97	Sana'a	0.6	2.24	15.	19.	36594	36337	399	1424	10159	12717	36596	36365	379	385
98	Bayt As	0.6	2.21	15.	19.	36598	36336	405	1404	10414	12971	36600	36363	380	386
99	Jabal Bahrah	0.6	2.13	15.	19.	36650	36389	399	1355	10489	13053	36653	36414	381	386
100	Silwah	0.6	2.05	16.	19.	36693	36433	391	1304	10560	13129	36695	36456	381	387
101	Safer	0.5	1.96	16.	19.	36728	36469	381	1253	10629	13199	36730	36491	382	388
102	Aryam	0.5	1.88	16.	19.	36764	36507	368	1202	10697	13267	36766	36527	382	388
103	Al Kurab	0.5	1.83	16.	19.	36800	36517	353	1169	10764	13250	36802	36536	383	388
104	Bir A'saker	0.5	1.71	16.	20.	36822	36571	336	1097	10826	13388	36824	36588	383	389
105	Garashah	0.4	1.64	16.	20.	36868	36620	319	1048	10894	13451	36869	36635	384	390
106	Hisn al Qa'	0.4	1.58	16.	20.	36902	36657	298	1011	10957	13507	36903	36671	384	390
107	Saigat Al	0.4	1.53	16.	20.	36940	36666	276	985.1	11020	13487	36941	36680	385	390
108	Ghayl Bin	0.3	1.39	16.	20.	36973	36737	252	892	11079	13612	36974	36748	385	391
109	Turaut	0.3	1.31	16.	20.	37009	36778	226	842	11139	13661	37010	36787	386	392
110	Magrah	0.3	1.23	16.	20.	37057	36830	199	793	11200	13712	37058	36838	387	393
111	Qalanah	0.2	1.15	16.	20.	37094	36871	170	743	11262	13756	37094	36879	387	393
112	Qishin	0.2	1.07	16.	20.	37145	36927	141	696	11315	13804	37145	36934	388	394
113	Haswayn	0.1	1.01	17.	20.	37181	36963	114	652	11568	14039	37181	36969	389	395
114	At Turiyah	0.6	2.40	14.	18.	36580	36330	388	1528	9560	12104	36582	36363	378	383
115	Obal	0.5	2.31	14.	18.	36612	36364	380	1469	9490	12050	36614	36394	378	383
116	Hammam	0.5	2.21	14.	18.	36631	36377	374	1406	9542	12109	36633	36404	378	383
117	Bayhan al	0.5	2.14	14.	18.	36641	36395	370	1366	9620	12193	36643	36420	378	384
118	Rahabah	0.5	2.06	14.	18.	36691	36446	364	1316	9693	12273	36693	36470	379	384
119	Harib	0.5	1.98	14.	18.	36731	36487	355	1265	9764	12348	36733	36509	380	385
120	Usaylan	0.5	1.90	14.	18.	36767	36526	345	1212	9832	12418	36769	36546	380	385
121	Al Aubailat	0.5	1.81	15.	18.	36804	36565	331	1160	9900	12485	36806	36584	381	386
122	Umyiq	0.4	1.71	14.	18.	36843	36599	309	1098	9842	12426	36845	36627	381	386
123	Misah	0.4	1.68	15.	18.	36866	36605	299	1076	10030	12529	36867	36621	382	387
124	Al Sababir	0.4	1.61	15.	18.	36902	36645	278	1031	10044	12540	36904	36660	382	387
125	Murabba Ba	0.4	1.55	15.	19.	36936	36681	259	995	10157	12646	36937	36694	383	388
126	Al Raosas	0.3	1.40	15.	19.	36976	36756	237	898	10220	12776	36976	36767	383	389
127	Hajab	0.3	1.31	15.	19.	37033	36819	213	848	10286	12836	37034	36829	384	390
128	Ad Dis	0.2	1.28	15.	18.	37083	36843	181	828	10201	12671	37084	36853	384	389
129	Sarar	0.2	1.17	15.	19.	37101	36895	166	759	10389	12920	37101	36903	385	390
130	Al Ais	0.2	1.15	16.	19.	37144	36901	141	742	10737	13176	37144	36908	386	391
131	Ad	0.5	2.34	13.	17.	36610	36372	357	1488	8850	11411	36612	36402	376	381
132	Yabis	0.5	2.25	13.	17.	36640	36406	346	1432	8692	11266	36642	36434	376	381
133	Suq Al Rabu	0.5	2.16	13.	17.	36641	36408	340	1379	8754	11335	36643	36434	376	381
134	Al Qarn	0.5	2.08	13.	17.	36664	36433	334	1326	8821	11410	36666	36457	377	382
135	Rada	0.5	2.00	13.	17.	36708	36479	327	1275	8892	11487	36710	36501	377	382
136	Al Ghylah	0.4	1.91	13.	17.	36745	36518	319	1223	8961	11560	36746	36538	378	383
137	Um Hays	0.4	1.83	13.	17.	36793	36569	308	1171	9032	11633	36794	36588	378	383
138	Nisab	0.4	1.76	13.	17.	36830	36610	294	1127	9100	11700	36832	36627	379	384
139	Qarn Al	0.4	1.68	13.	17.	36856	36613	279	1074	9164	11681	36857	36629	379	384
140	Tabaq	0.4	1.61	14.	17.	36910	36697	262	1037	9233	11828	36911	36712	380	385
141	Al Sudara	0.3	1.56	14.	17.	36942	36705	242	1005	9297	11809	36943	36719	380	385
142	Mihmidah	0.3	1.41	14.	17.	36982	36780	221	906	9360	11942	36983	36791	381	386
143	Fuh	0.2	1.29	13.	17.	37043	36855	184	835	9105	11685	37043	36864	381	386
144	Al Marir	0.4	2.19	12.	16.	36650	36430	310	1393	7889	10480	36651	36456	374	379

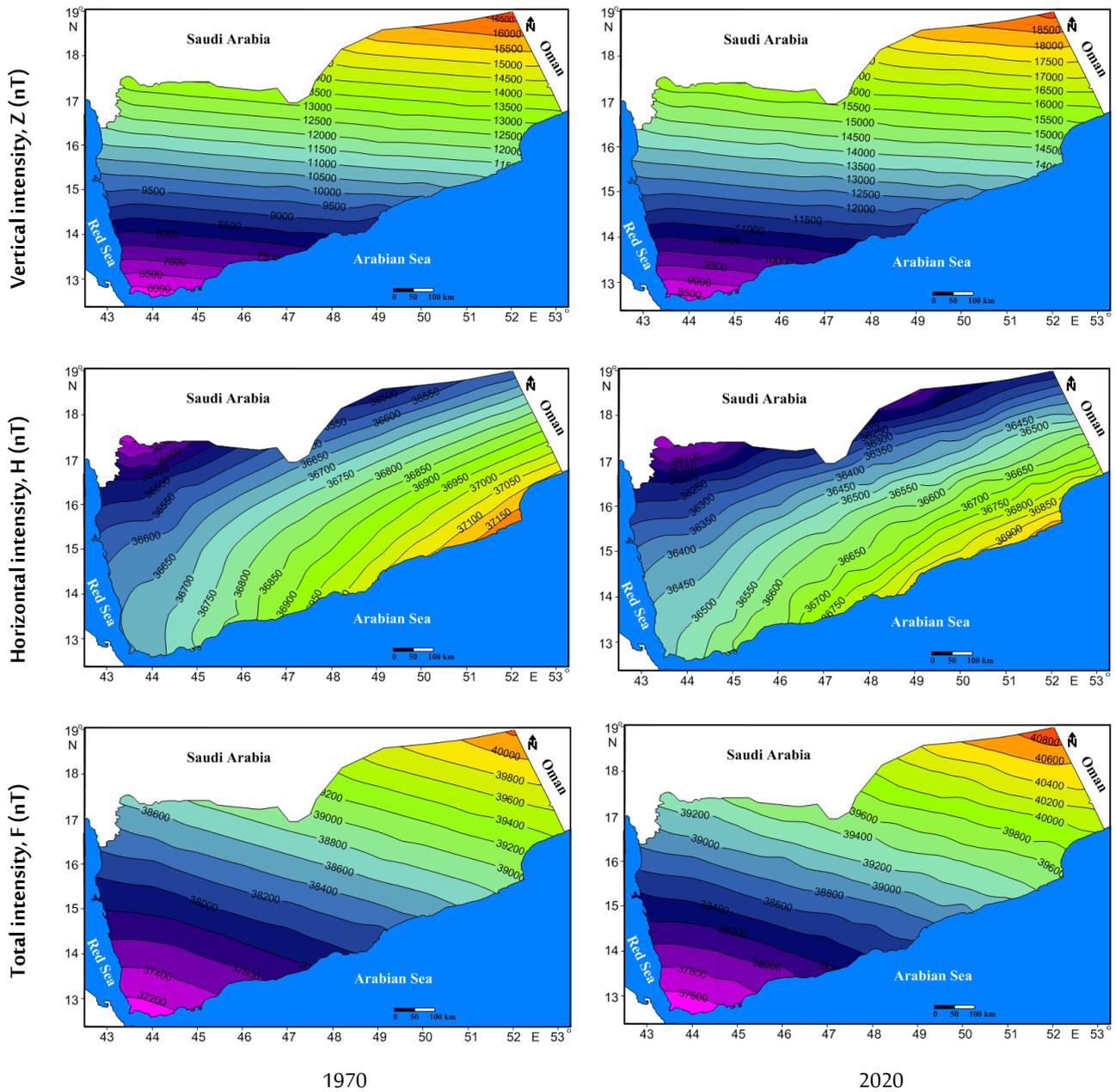
145	Al Hazm	0.4	2.11	12.	16.	36659	36441	306	1343	7983	10580	36661	36466	375	379
146	An Nadirah	0.4	2.02	12.	16.	36675	36460	298	1286	8020	10623	36676	36482	375	379
147	Juban	0.4	1.93	12.	16.	36730	36517	292	1234	8093	10704	36731	36538	376	380
148	Al Zahir	0.4	1.85	12.	16.	36759	36549	282	1181	8160	10773	36760	36569	376	381
149	Mudiyah	0.4	1.76	12.	16.	36818	36612	272	1129	8233	10850	36819	36630	377	382
150	Al Hamiyah	0.4	1.68	12.	16.	36860	36659	258	1075	8301	10918	36861	36675	377	382
151	Al Mahfad	0.3	1.61	12.	16.	36886	36686	249	1036	8439	11053	36887	36700	378	383
152	E Al Mazali	0.3	1.50	12.	16.	36935	36743	225	968	8433	11043	36936	36756	378	383
153	Al Tu'ayniq	0.3	1.43	13.	16.	36978	36789	210	920	8600	11203	36979	36801	379	384
154	Qana	0.2	1.34	13.	16.	37016	36834	187	864	8626	11223	37017	36844	380	385
155	Al Kudayhah	0.4	2.12	10.	14.	36662	36456	275	1354	7089	9695	36663	36481	373	377
156	Al Misrakh	0.4	2.04	11.	14.	36670	36467	269	1300	7154	9767	36671	36491	373	377
157	Al Durayhbah	0.4	1.95	11.	15.	36718	36519	265	1247	7225	9848	36719	36540	374	378
158	Al Habilayn	0.3	1.85	11.	15.	36743	36527	256	1180	7292	9831	36743	36546	374	378
159	Jabal Ummar	0.3	1.78	11.	15.	36795	36603	247	1140	7363	9995	36796	36621	375	379
160	Jabal al Urays	0.3	1.68	11.	15.	36800	36655	236	1078	7417	9963	36801	36607	375	379
161	Hisn	0.3	1.61	11.	15.	36876	36694	221	1032	7499.9	10132	36877	36708	376	380
162	Hisn Balid	0.3	1.53	11.	15.	36915	36736	210	981	7695	10322	36916	36749	377	381
163	Dhubab	0.3	2.06	9.7	13.	36656	36465	239	1313	6286	8907	36657	36489	371	375
164	Al-Hisn	0.3	1.97	9.8	13.	36681	36494	234	1259	6354	8984	36682	36516	372	376
165	Jabal Ayn	0.3	1.89	9.9	13.	36718	36536	228	1206	6423	9061	36719	36556	372	376
166	Al Fyush	0.3	1.79	10.	14.	36765	36587	220	1148	6491	9135	36765	36605	373	377
167	Zinjubar	0.3	1.75	10.	14.	36793	36614	223	1121	6764	9407	36794	36631	374	378
168	Jabal Al	0.3	2.02	8.9	12.	36639	36458	216	1287	5776	8405	36639	36481	370	374
169	Ras Al Arah	0.3	1.94	8.9	12.	36672	36496	209	1237	5761	8400	36672	36517	371	374
170	Ra's Qa'wah	0.3	1.86	9.1	13.	36710	36537	207	1187	5907	8553	36711	36557	371	375
171	Aden	0.3	1.76	9.4	13.	36754	36584	203	1127	6121	8771	36754	36602	372	376
Minimum		0.1	1.01	8.9	12.	36271	35962	114	652	5760	8400	36275	35999	370	374
Maximum		0.8	2.62	24.	27.	37181	36963	550	1648	16819	19176	37181	36969	402	409
Range		0.6	1.61	15.	14.	910	1001	437	996	11059	10776	906	969	315	353

Figures

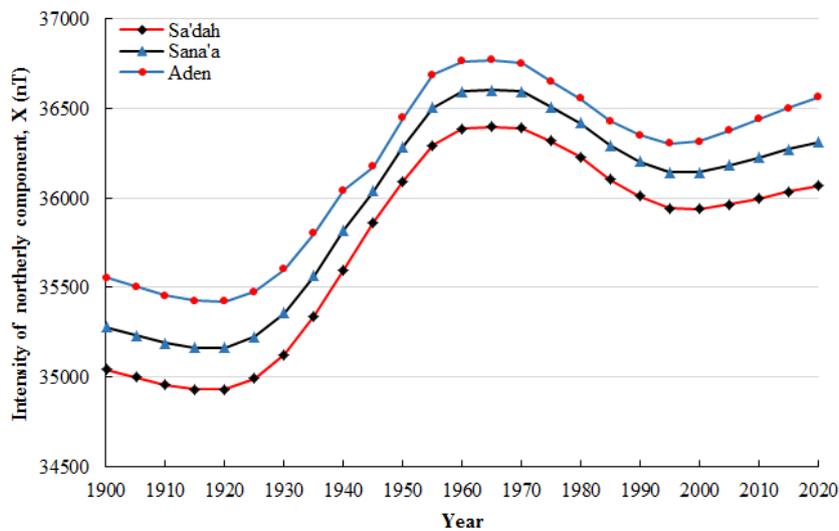


شكل 1: المواقع التي تم الحصول على عناصرها المغناطيسية

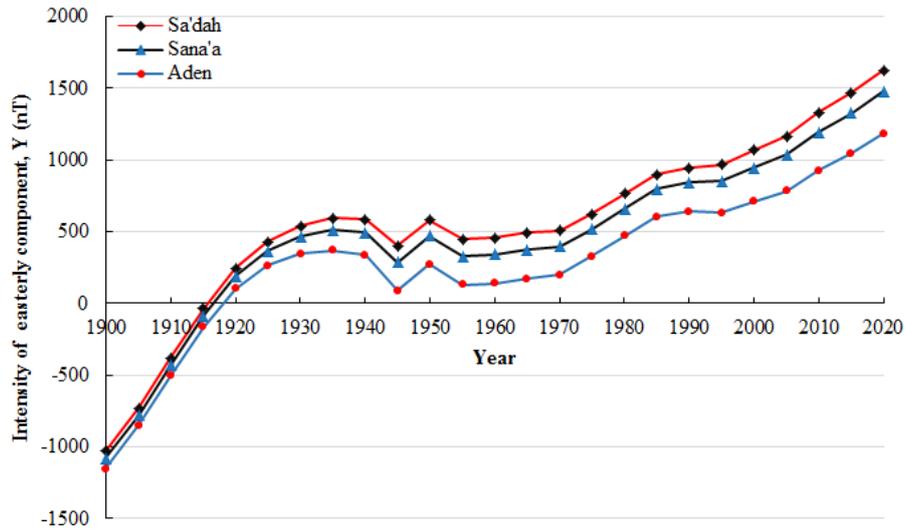




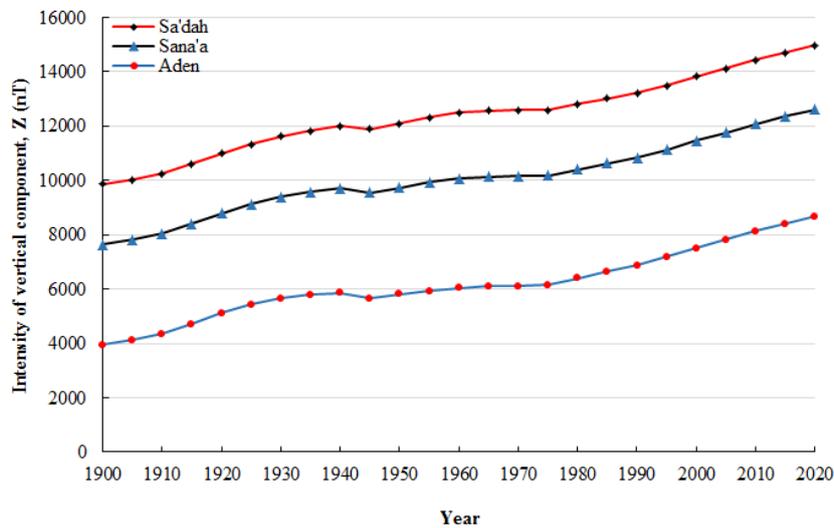
شكل 2: خرائط خطوط تساوي قيم عناصر الحقل المغناطيسي الأرضي المرجع العالمي في عام 1970 وبداية 2020م



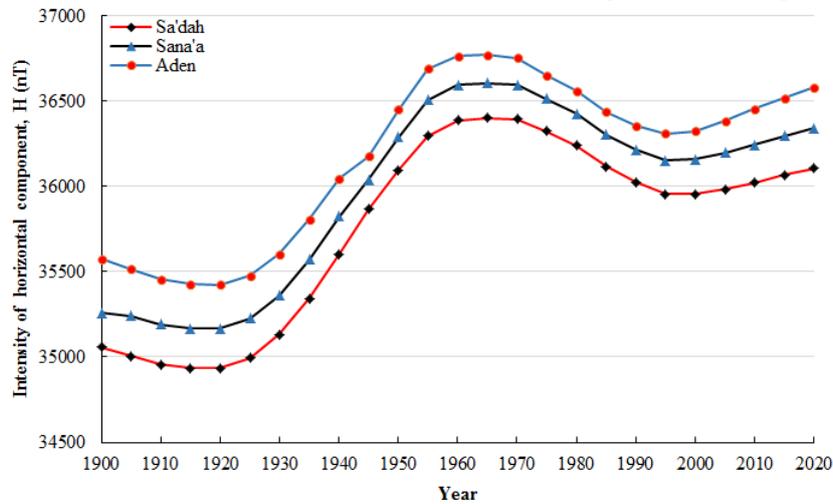
شكل 3: منحنيات تغير شدة المركبة الشمالية في القرن الماضي وبداية القرن الحالي في مراكز مدن عدن، صنعاء وصعدة



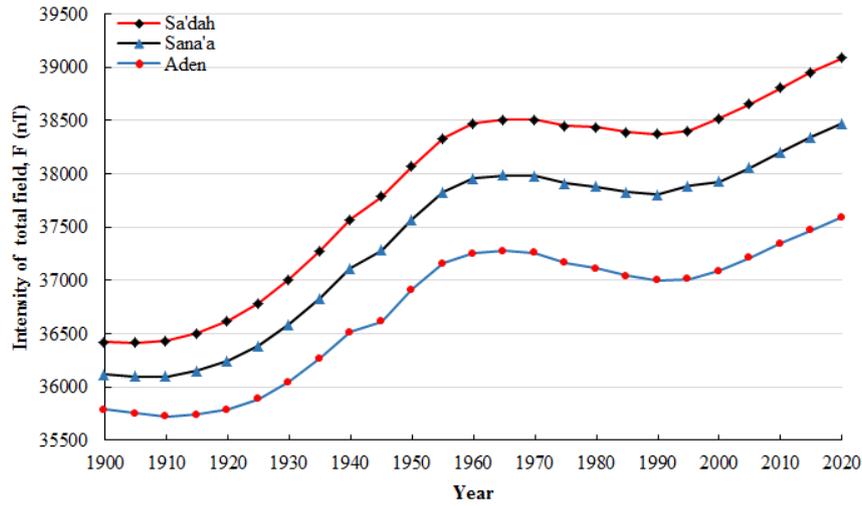
شكل 4: منحنيات تغير شدة المركبة الشرقية في القرن الماضي وبداية القرن الحالي في مراكز مدن عدن، صنعاء وصعدة



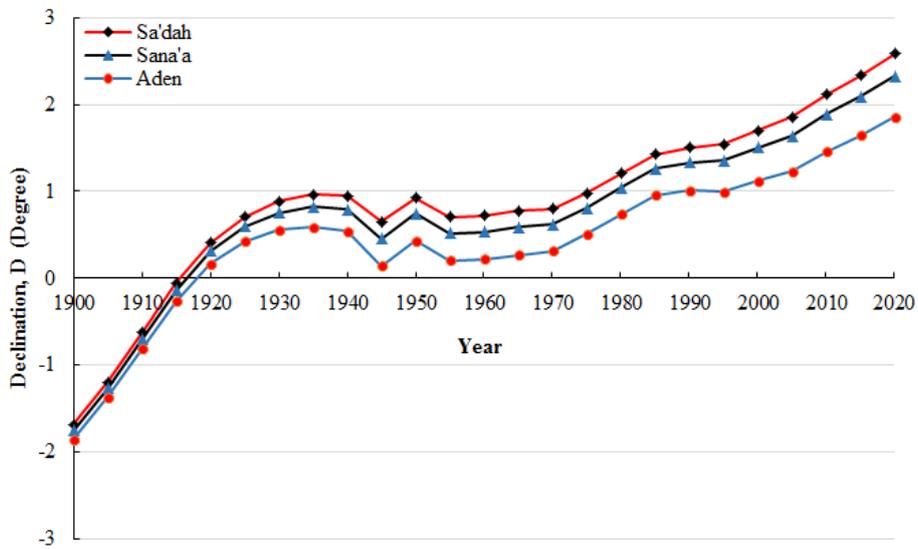
شكل 5: منحنيات تغير شدة المركبة العمودية في مراكز مدن عدن، صنعاء وصعدة في القرن الماضي وبداية القرن الحالي



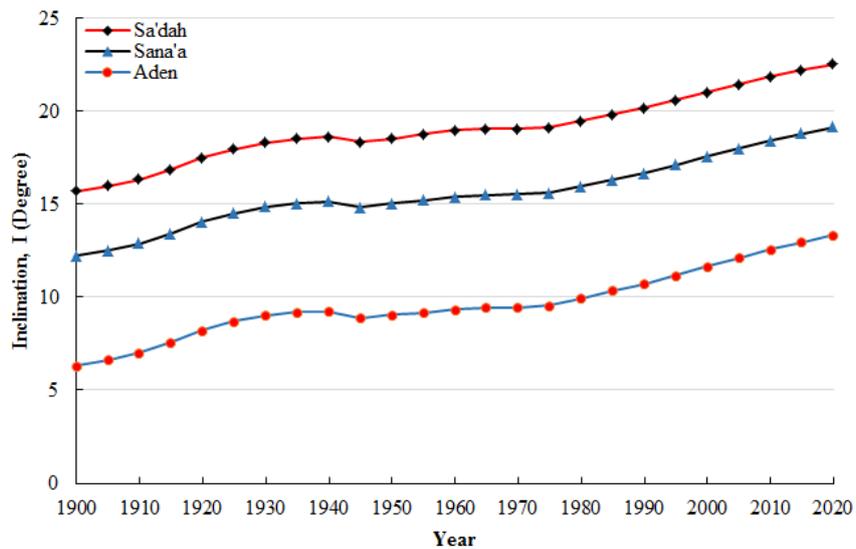
شكل 6: منحنيات تغير شدة المركبة الأفقية في مراكز مدن عدن، صنعاء وصعدة في القرن الماضي وبداية القرن الحالي



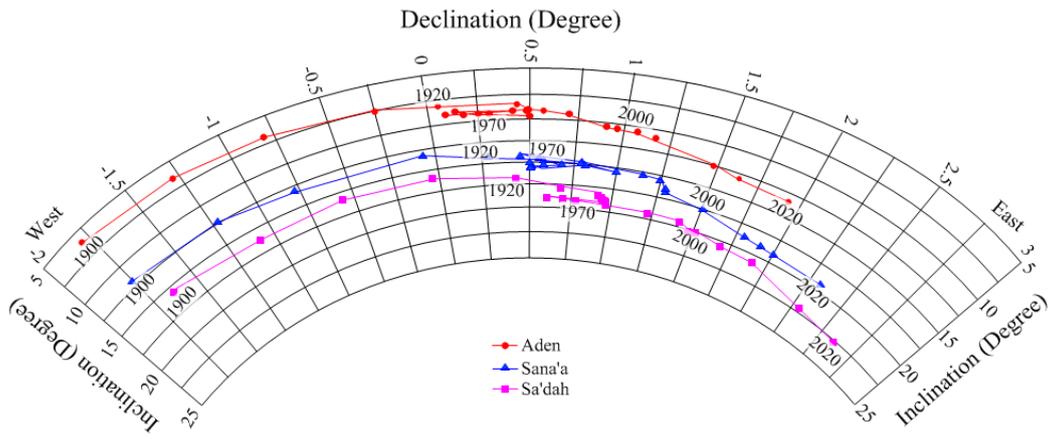
شكل 7: منحنيات تغير الحقل الكلي في القرن الماضي وبداية القرن الحالي في مراكز مدن عدن، صنعاء وصعدة



شكل 8: منحنيات تغير الانحراف المغناطيسي في القرن الماضي وبداية القرن الحالي في مراكز مدن عدن، صنعاء وصعدة



شكل 9: منحنيات تغير الميل المغناطيسي في القرن الماضي وبداية القرن الحالي في مراكز مدن عدن، صنعاء وصعدة



شكل 10: منحنيات التغيرات القرنية للانحراف والميل في مراكز مدن عدن، صنعاء وصعدة في القرن الماضي وبداية القرن الحالي